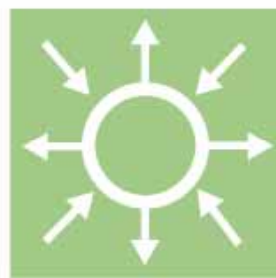


Utvärdering av oförstörande provningsmetoder med möjliga tillämpningar inom kärnkrafttekniska betongkonstruktioner

Elforsk rapport: 08:24



Peter Ulriksen

Januari 2008

ELFORSK

Utvärdering av oförstörande provningsmetoder med möjliga tillämpningar inom kärnkrafttekniska betongkonstruktioner

Elforsk rapport: 08:24

Förord

Elforsk driver sedan 2007 ett forskningsprogram kring betongkonstruktioner inom kärnkraftverken. Det finns ett behov av att bygga både kompetens och att utveckla teknikbasen för teknisk förvaltning av byggnader och konstruktioner inom kärnkraftindustrin. Det övergripande målet med det betongtekniska programmet är att säkerställa avsedd livslängd och hög tillgänglighet för svenska kärnkraftverk med bibehållen säkerhet. Programmet finansieras av Vattenfall, av kärnkraftverken i Forsmark, Ringhals samt OKG i Oskarshamn, av Statens Kärnkraftsinspektion SKI samt av Teollisuuden Voima Oy (TVO) i Finland.

Inom programmet har föreliggande projekt, "Utvärdering av oförstörande provningsmetoder med möjliga tillämpningar inom kärnkrafttekniska betongkonstruktioner (Elforsk-projekt BET 003)" genomförts. Applicerbara och rättvisande oförstörande provningsmetoder (OFP) blir ett mycket viktigt verktyg för att kunna bedöma statusen på de stora betongkonstruktioner som finns inom kärnkraftverken.

Projektet har genomförts av docent Peter Ulriksen vid Lunds Tekniska Högskola och följts av styrgruppen för Elforsks Betongprogram med följande medlemmar; Lars-Erik Berglund och Emma Björkenstam Forsmarks kärnkraftverk, Jonas Bergfors och Mårten Larsson OKG, Jan Gustavsson och Urban Broms Vattenfall Ringhals, Behnaz Aghili SKI, Juha Riihimäki, TVO, Christian Bernstone och Manouchehr Hassanzadeh, Vattenfall Research and Development och Lars Wrangensten Elforsk. Elforsk tackar styrgruppen för värdefulla kommentarer och synpunkter under projektgenomförandet.

Stockholm i mars 2008

Lars Wrangensten

Elforsk AB

Programområde El- och värmeproduktion.

Sammanfattning

Det har under de senaste 10 åren genomförts en rad projekt där oförstörande provning (OFP) av betong har ingått. Det kan förmodas att resultaten i de olika projekten är snarlika. Innan fortsatta projekt inom området initieras utförs här en genomgång av de projektrapporter som branschen har tillgång till. Läsaren måste vara medveten om att OFP generellt är ett svagt utvecklat område i Sverige och att det pågår intensiv verksamhet utomlands avseende utveckling av OFP med inriktning mot bl a betongproblematiken. Insikten om att OFP är ekonomiskt nödvändig om vi skall kunna underhålla åldrande betongkonstruktioner har knappt fått fotfäste hos oss. Någon möjlighet att göra konstruktionsberäkningar med en generellt nedsatt hållfasthet i betongen synes inte finnas, då man t ex funnit en 100-procentig spridning i tryckhållfasthetsvärden på kärnor uttagna ur finska reaktorinneslutningar. I stället är det lokala fel eller förändringar man måste räkna med och för att inhämta denna information är det svårt att se andra möjligheter än att använda OFP-metoder. Tillståndskontroll innebär att man i ett utvalt område, vid ett valt tillfälle på tidslinjen, tillämpar olika tekniker, t ex OFP, för att skaffa sig tillräcklig information för att kunna göra en bedömning av konstruktionsdetaljens funktion relativt ursprunglig design. Övervakning innebär däremot att man observerar kontinuerligt längs tidslinjen och alltså kan observera händelser. Genom att införa kontinuerlig övervakning höjs säkerhetsnivån och då bör man kunna tillåta reducerade säkerhetsfaktorer eller variationsbredd i antagna parametrar. De tidsserier som därvid skapas är av mycket stort värde för kommande generationers möjligheter att bedöma åldrande konstruktioner.

Syftet med den föreliggande rapporten är att ge rekommendationer om vilka OFP-metoder som har störst värde att gå vidare med vad avser *praktisk användning* och *utveckling*, under förutsättning att metoderna skall ge tillförlitliga indata till konstruktionsberäkningar, vilka syftar till att förlänga drifttiden för kärnkraftverken. Utöver att fastställa konstruktionens överensstämmelse med ursprungsritningarna (geometrin), tillkommer då att bedöma betongens lokala hållfasthet, sprickighet, armeringskorrosion, spjälkning/delaminering och kraftförluster i spännkablar genom krypning och reduktion av tvärsnitt orsakad av korrosion.

Det är tydligt att man då i *praktisk användning* behöver en hel arsenal med metoder, i huvudsak de som redan tillämpats i genomgåna rapporter: Radar (Konstruktionens geometri), Stående vågor (Konstruktionens geometri), Högenergiröntgen (Konstruktionens geometri, Hållrum, Spännkablar), Ytvågsseismik (Konstruktionens geometri, Hållfasthet), Skjuvvågsreflektion (Konstruktionens geometri, Hållrum), Täcksiktmetare (Konstruktionens geometri), Refraktionsseismik (Hållfasthet), Galvanostatik (Korrosion) och Frekvensrespons (Spjälkning/delaminering). Det är emellertid bara de metoder som baseras på seismiska vågutbredningsfenomen som har en fysikalisk grund som kopplar resultaten till hållfasthetsparametrar. Därför och i vissa fall på grund av lovande inledande resultat, rekommenderas att *utveckling* av följande seismiska metoder genomförs: Skjuvvågsreflektion (Konstruktionens geometri, Hållrum), Kontaktlösa ytvågsmätningar (Hållfasthet), Detektor för olinjäritet (Sprickor, även mikro-), Impedansmätning (Spjälkning/delaminering) och Spännkablar som vägledare (Spännkablar).

För övervakning rekommenderas undersökningar avseende Akustisk emission, Seismiska nätverk och Modanalys.

Summary

Non-destructive Testing (NDT) has been applied in several Swedish nuclear power plant projects in the last ten year period. It is assumed that the results in these projects are similar. Before continuing with further development this survey of available reports is performed. The reader must be aware that NDT of concrete is presently poorly developed in Sweden and that we are aware that intense development is taking place abroad. Here, it is not yet widely recognized that NDT is necessary, if we shall be able to economically maintain ageing concrete structures. Experience from conventional testing of cores, removed from a nuclear reactor containment in Finland, show that there is a 100% variation in strength - thus there is no possibility to assign general values to concrete strength. Instead it is necessary to find the local errors or degradations. To do this it is difficult to see any other possibilities than assessment based on NDT.

Assessment is the application of different techniques, like NDT, at a specific point and time in order to calculate the state of the detail relative the original design. *Monitoring*, in contrast, means that the structure is continuously supervised along the axis of time which allows the detection of *events*. The level of security is thus elevated by monitoring and this should have as consequence that safety factors or coefficients of variation can be set lower. The time series created by monitoring are of great value for the possibility of future generations to evaluate ageing constructions.

The purpose of this report is to give recommendations regarding which NDT-methods are suitable for *practical application* and which should be selected for further *development*, provided that the results are intended to be used in calculations, that will result in the remaining service-life of the plant. In order to do this the engineer has to determine the as-built conditions, local concrete strength, fissures, rebar corrosion, delamination and losses in tendon forces.

It is obvious that for the practical application it is necessary to use a fleet of methods, mainly those used in the available reports: Radar (geometry of the construction), Standing waves (geometry), X-ray (geometry, cavities, tendons), Surface waves (geometry, strength), Shear wave reflection (geometry, cavities), Covermeters, Refraction seismics (strength), Galvanic methods (corrosion) and Frequency response (delamination).

However, only the methods based on mechanical wave propagation has a physical phenomenology that connects to the strength of concrete. Because of that and promising early results, it is recommended to develop the following methods further: Shear wave reflection (geometry, cavities), Contact less surface wave measurements (strength), Nonlinearity detector (fissures), Impedance measurements (delamination) and the use of tendons as wave guides.

For monitoring it is recommended to study Acoustic emission, Seismic networks and Modal analysis.

Innehåll

1	Bakgrund	1
2	Målsättning	2
3	Särskilda iakttagelser	3
4	Tillståndskontroll och Övervakning	5
5	Tillståndskontroll	7
5.1	Tillståndskontroll i reaktorinneslutningar	7
5.2	Tillämpningsområden för OFP vid tillståndskontroll i reaktorinneslutningar	9
5.3	Sammanfattning avseende tillståndskontroll	12
5.4	Rekommendationer avseende utveckling av tillståndskontroll.....	13
6	Övervakning	17
6.1	Övervakning av reaktorinneslutningar	17
6.2	Rekommendationer avseende utveckling av övervakning.....	19
7	Tänkbara utförare av utvecklingsinsatser	20
8	Diskussion	22
8.1	OFP har många gånger inte motsvarat de förväntningar man haft!	22
8.2	Kan OFP bidra till att reducera säkerhetsfaktorerna?.....	23
8.3	Kan OFP leverera den information som konstruktören behöver?	23
8.4	Vad är noggrannheten hos OFP-metoder? Kan man t ex skilja mellan 40 och 50 mm täcksikt?.....	24
8.5	Eftersom det saknas generellt giltiga samband mellan ljudhastighet och hållfasthet kan man inte ge sig på en okänd konstruktion och bestämma dess egenskaper!	24
8.6	Hur kan OFP-metoder baserade på olinjäritet bedöma den återstående styrkan när OFP-metoder inte kan uppskatta materialens hållfasthet? ...	25
8.7	På vilket djup kan hålrum detekteras och kan hålrum i spännkabelrör detekteras?	25
8.8	Är utvecklingsmöjligheterna som presenteras författarens egna funderingar eller är de en sammanställning av referensernas förslag på utveckling?.....	26
8.9	OFP:s status? Kan det användas? Är slutsatser entydiga eller innehåller de förbehåll och undantag?	26
8.10	Hur kan OFP ha utvecklingsmöjligheter om metoderna inte kan bestämma betongens hållfasthet?	27
8.11	Vissa diskussioner är generella, det skulle vara bra med en summering/diskussion angående OFP-metoders tillämpbarhet beträffande reaktorinneslutningen med utgångspunkt från de verkliga dimensionerna.	27
8.12	Hur påverkar belastningen OFP-metodernas resultat?	27
8.13	Hur mycket data skall man samla in i syfte att övervaka en konstruktion?.....	28
8.14	Är OFP metoderna ekonomiskt nödvändiga eller kan underhållet skötas ändå?	28
8.15	Övervakning måste vara yteffektiv, man kan inte täcka en konstruktion med sensorer!	28
8.16	Vilken är nyttan med kontinuerlig övervakning?	28

8.17	Man upprätthåller hög säkerhet i betongdammar utan kontinuerlig övervakning!	29
9	Slutsatser	30
10	Tillkännagivanden	31
11	Referenser	32
12	Bibliografi	33
13	BILAGOR	34

1 Bakgrund

Det har under de senaste 10 åren genomförts en rad projekt där oförstörande provning (OFP) av betong har ingått. Den största aktören är Force Technology i Danmark, som har gjort likartade tester med olika OFP-metoder åt olika uppdragsgivare. Det kan förmodas att resultaten är snarlika. Innan fortsatta projekt inom området initieras så behövs en genomgång av de projektrapporter som branschen har tillgång till. Föreliggande rapport omfattar denna genomgång.

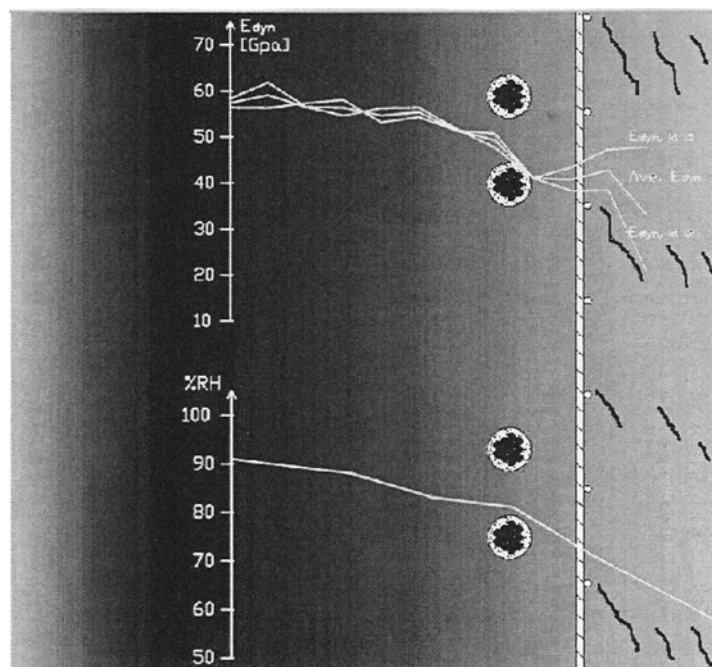
2 Målsättning

Läsaren måste vara medveten om att OFP generellt är ett svagt utvecklat område i Sverige och att det pågår intensiv verksamhet utomlands avseende utveckling av OFP med inriktning mot bl a betongproblematik. Insikten om att OFP är ekonomiskt nödvändig om vi skall kunna underhålla åldrande betongkonstruktioner har knappt fått fotfäste hos oss. En fullständig litteraturstudie med internationell utblick och systematiserande analys skulle kräva en flerårig arbetsinsats.

Arbetet avser att gå igenom och analysera olika möjliga metodiker för oförstörande provning med tillämpning på betongtekniska konstruktioner i kärnkraftverk. Som bakgrundsmaterial används rapporter enligt Bilaga 1. Frågeställningen om metodernas förmåga att ge resultat som kan användas som tillförlitliga indata till konstruktörers värdering av konstruktioner är mycket viktig. En värdering av vilka metoder som har störst värde att gå vidare med vad avser *utveckling* och *användning* skall redovisas inom uppdraget. Enligt tilläggsuppgift 20071217 kommer denna analys även att utmynna i rekommendationer om vilka metoder som är lämpliga för kontinuerlig övervakning av kärnkrafttekniska betongkonstruktioner. Rapporten kommer därför att indelas i ett avsnitt avseende tillståndskontroll och ett annat avseende övervakning.

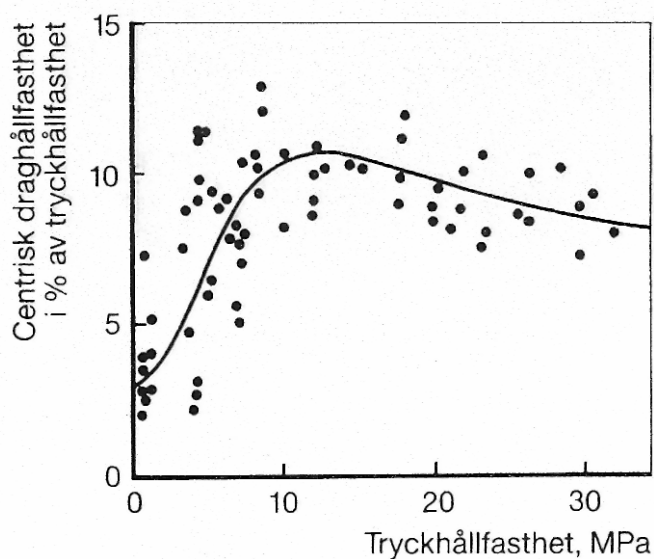
3 Särskilda iakttagelser

I rapportmaterialet finns det iakttagelser som bör lyftas fram särskilt. Begreppet *åldring*, en sorts uniform försämring av betongens tillstånd, ifrågasätts i flera rapporter. Begreppet saknar tydlig definition. Någon möjlighet att göra konstruktionsberäkningar med en generellt nedsatt hållfasthet i betongen synes därför inte finnas. I stället är det lokala fel eller förändringar man måste räkna med och detta ställer naturligtvis till problem för FEM-analys då det skapar ett mycket stort informationsbehov om alla celler i en FEM-modell skall fyllas med relevanta data och inte bara med generellt antagna värden. Detta belyses i (11) av att man i Barsebäcksverket finner, efter misstanke, att det finns ett hålrum med dimensionerna 350 x 200 x 30 mm i anslutning till en rörgenomföring i reaktorinneslutningen, vilket konstaterats med röntgen, samt att man i de finska kärnkraftverken Olkiluoto 1 och 2 kunnat konstatera att brotthållfastheten i betongen varierar mellan 29.4 - 64.6 MPa respektive 37.6 - 72.6 MPa. En stor del av denna stora variation kan troligen tillskrivas de sprickor som glidformsgjutningen skapar i de yttre delarna av reaktorinneslutningens betong, **Figur 1** från (11), men den stora spridningen visar ändå att man måste basera sina hållfasthetsvärden på någon form av lokal undersökning. Orsaken till sprickorna kan sökas i att betongens draghållfasthet är betydligt lägre än tryckhållfastheten i tidigt skede även om draghållfastheten uppvisar en snabbare tillväxthastighet det första dygnet, **Figur 2**.



Figur 1. Bilden visar ett schematiskt tvärsnitt av en reaktorinneslutning (11). Utsidan till höger, tätsiktet i form av stålplåt (liner) till vänster.

De två kurvorna visar överst elasticitetsmodulens värde på olika djup, underst relativa fukthalten. De fyra ringarna med svart kärna är spännkabelrör. Till höger i bilden, utanför ytarmeringen ses de lutande sprickor som konstaterats i flera reaktorinneslutningar och som sannolikt skapas av att glidformen lyfts innan betongen uppnått någon nämnvärd draghållfasthet. (Bildmaterial: Peter Shaw, Force Technology)



Figur 2. Relationen mellan centrisk draghållfasthet och tryckhållfasthet vid tidig ålder. (Byfors 1980) Ur Betonghandboken Material s 261.

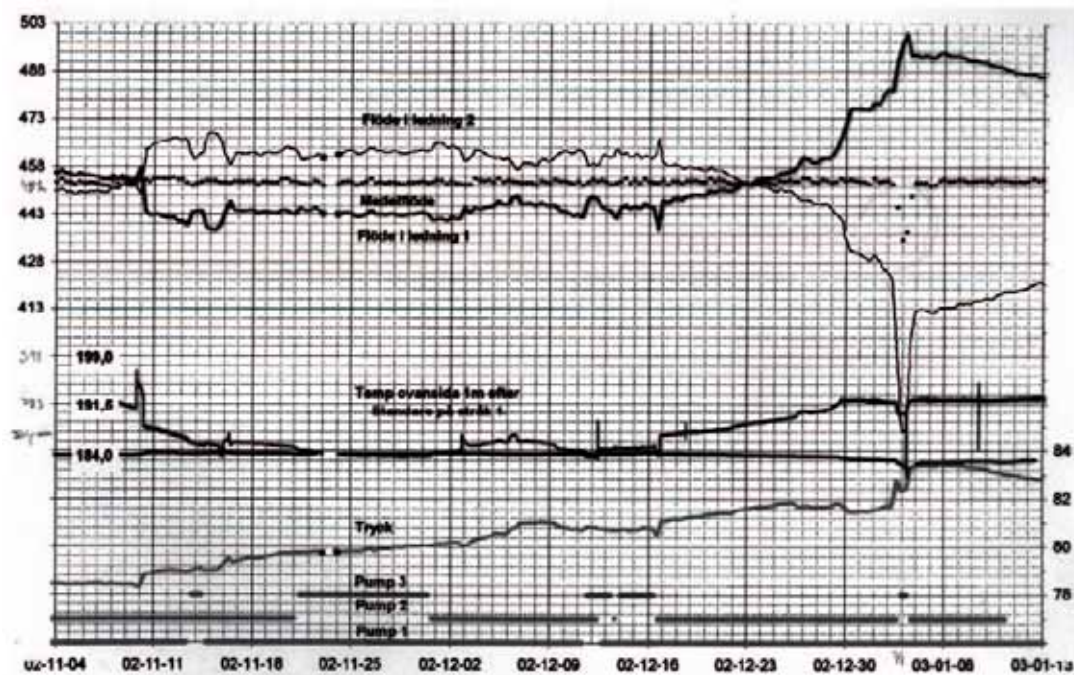
4 Tillståndskontroll och Övervakning

Tillståndskontroll innebär att man i ett utvalt område, vid ett valt tillfälle på tidslinjen, tillämpar olika tekniker för att skaffa sig tillräcklig information för att kunna göra en bedömning av konstruktionsdetaljens funktion relativt ursprunglig design. Övervakning innebär däremot att man observerar kontinuerligt längs tidslinjen och alltså kan observera händelser. En händelse är en förändring från ett tillstånd till ett annat och kan således inte konstateras genom tillståndskontroll som utförs vid en diskret tidpunkt.

Tillståndskontroll innebär att man kan få ett spridningsmått på konstruktionsdetaljens kvalitet. Det innebär att osäkerheten i t ex hållfasthet kan reduceras, vilket bör kunna återspeglas i reducerade säkerhetsfaktorer.

Övervakning genererar tidsserier ur vilka värdefull statistik kan utvinnas och byggas in i beslutsmodeller avseende underhållsarbete och tidpunkter för tillståndskontroll. Dessa tidsserier är fundamentala för möjligheten att alstra regelbaserade automatiserade alarm (16). Möjligheten till sådana alarm innebär rimligtvis att en lägre formell säkerhetsnivå i konstruktionsberäkningar kan accepteras hos en konstruktion. Då en händelse genom övervakning kan konstateras ha inträffat blir det aktuellt att lokalisera händelsen och att utföra en tillståndskontroll i det aktuella området för att kunna beskriva händelsen.

För att illustrera värdet av tidsserier visas nedan förloppet i samband med den sk "Blandarhändelsen" (16) i Barsebäck 2 hösten 2002, **Figur 3**. En konstruktionsdetalj i matarvattenstråket lossnade. Denna händelse anses vara det allvarligaste tillbudet i svensk kärnkraftproduktion hittills och ledde till att SKI anmälde Barsebäck Kraft AB till Åklagarmyndigheten. I (16) finner man att regelsystem bättre skulle hanterat situationen än vad som skedde. Mätdata av nedanstående typ kan fungera som underlag för ett sådant regelsystem. Misstanke om att något var onormalt uppstod 02-11-10, då en onormal händelse kunde konstateras enligt diagrammet. Flödesbalansen försköts då momentant och ett nytt, ostabilt tillstånd pågick till slutet på december då en ny, fast denna gång gradvis, tillståndsförändring skedde. Beslut om nedgång i Barsebäck 2 togs 03-01-13.



Figur 3. Diagrammet (16) visar överst flödet i de två matarvattenstråken, vilka i normalfallet skall vara lika stora. Kurvan mellan de två flödena visar flödesskillnaden. Därunder visas temperaturer och tryck och underst vilka matarvattenpumpar som varit inkopplade vid respektive tidpunkt.

5 Tillståndskontroll

5.1 Tillståndskontroll i reaktorinneslutningar

En reaktorinneslutning har, enligt uppgift från industrins företrädare, en yta av 3000 m², vilket ställer stora krav på den urvalsprocess som leder fram till en lokal tillståndskontroll.

För tillståndskontroll gäller att man bör börja med översiktliga och snabba metoder för att därefter, efterhand som skadebilden klarnar, sätta in allt mer precisa och kostnadskrävande metoder. Detta avspeglas i CONTECVET-manualen, som är konstruktörsdriven, där man för t ex frostsador (5) rekommenderar följande tillvägagångssätt:

Steg 1: Platsbesök där man tittar efter synliga skador, försöker verifiera att frost är orsaken till skadorna samt försöker bedöma mikro-klimatet, dvs fuktförhållande, närvaro av salter och risk för upprepade temperaturcykler under nollpunkten.

Om det finns signifikanta skador och konsekvenser fortsätter man med:

Steg 2: Insamling av data, t.ex. byggår, beräkningar, relationsritningar, materialprovningar, underhåll, reparationer, tidigare undersökningar.

Utgående från Steg 1 och 2 gör man:

Steg 3: Preliminär undersökning indelad i en kvalitativ och en kvantitativ nivå. En kvalitativ (nivå 1): uppskattning görs över skador och konsekvenser för konstruktionen eller konstruktionerna och de indelas också i olika klasser efter hur strängt klimatet är. För de mest skadade och hårdast utsatta delarna gör man sedan en kvantitativ preliminär undersökning (nivå 2) bestående av en preliminär statisk beräkning där man använder "lower bound values" för hållfasthet. Finns användbara materialdata från den aktuella konstruktionen kan naturligtvis dessa användas i första hand.

Steg 3 ger underlag för steg 4:

Steg 4: Beslut för vidare åtgärd görs: ingen vidare undersökning behövs, en detaljerad undersökning måste göras eller konstruktionen måste omedelbart repareras, förstärkas eller rivas.

En detaljerad undersökning indelas i:

Steg 5:

A: Bedömning av den aktuella statiska säkerheten

B: Bedömning av den framtida statiska säkerheten

Steg 6: Uppskattning av synergi med andra nedbrytningsmekanismer (ibland också aktuellt att kontrollera vid preliminära undersökningar).

I (4) anges att det saknas internationellt accepterade normer för tillståndskontroll, men i (20) pekas på flera guider för tillståndsbedömning av konstruktioner med hjälp av avancerade mätmetoder, som tagits fram efter det att (4) skrevs.

I (8) anges: "för att oförstörande provning skall bli ett accepterat verktyg krävs det att konstruktörer, material- och provningsspecialister avser samma saker när de kommunicerar. I annat fall finns det en uppenbar risk att undersökningar utförda med OFP-metoder görs med felaktiga förväntningar dvs att resultaten inte bidrar till att lösa problemen. Motsatsen gäller också. Om OFP-metodernas förmåga inte kan spridas hos de berörda grupperna finns det en uppenbar risk att tillståndskontroll blir dyrt på grund av oönskade överraskningar, vilka hade kunnat förutsägas om OFP-metoder hade använts."

Enligt uppdraget skall analysen ge rekommendation om vilka metoder som har störst värde att gå vidare med, vad avser utveckling och användning, under förutsättning att metoderna skall ge tillförlitliga indata till konstruktionsberäkningar. Man får här förutsätta att beräkningarna avser tillståndskontroll som skall leda till en uppfattning om hur lång resterande drifttid konstruktionen kan tänkas ha (11,12). En annan implicit förutsättning är rimligen att det skall finnas utvecklingsresurser inom landet för de metoder som är nya, eller intressanta men ännu inte färdigutvecklade.

I (1) inventeras de olika tillämpningsområdena för OFP-metoder i betong:

att fastställa en konstruktions / konstruktionsdels utformning (t ex att bekräfta överensstämmelse med konstruktionshandlingar)

att upptäcka yttre, inre eller begynnande skador i en konstruktion.

att karaktärisera och kvantifiera redan identifierade skador.

att kontrollera genomförda reparationer.

till dessa områden kan man från (11-14) lägga

att undersöka betongens åldringsnivå / återstående hållfasthet

att undersöka förekomsten av hålrum i betongen och i cement i spännkabelrör

att kartlägga sprickdjup inom stora ytor

I (7) har man av många olika möjliga tillämpningar för OFP-metoder kommit fram till att detektering av hålrum och kartläggning av inhomogenitet i betong liksom detektering av horisontella och vertikala sprickor är de viktigaste tillämpningarna. Kartläggning av armeringsjärn och spännkabelrör fick betydligt lägre prioritet i intressegruppen. Detta gäller dock betong i vattenkraftanläggningar.

Här förutsätts, som ovan nämnts, att konstruktören engageras för att göra en uppskattning av reaktorinneslutningens återstående livslängd. Man torde kunna säga att för konstruktören är då de viktigaste parametrarna konstruktionens överensstämmelse med konstruktionsritningarna - det verkliga utförandet, betongens återstående hållfasthet, eventuell reduktion av de bärande tvärsnitten samt reduktion av kraft i spännkablar, det som sammantaget kallas konstruktionens "profil" (11, 12). Utöver en eventuell hållfasthetsnedsättning, pga åldring i själva betongmassan, tillkommer alltså att bedöma sprickighet, armeringskorrosion, spjälkning/delaminering och kraftförluster i spännkablar genom krypning och reduktion av tvärsnitt genom korrosion. Dessa tillämpningar diskuteras nedan med identifiering av de OFP-metoder som är värdefullast att gå vidare med avseende användning och bedöms mest utvecklingsbara.

I den följande framställningen har så långt möjligt, liksom i rapportsammanfattningsdelen, eftersträvat att beteckna de olika mätmetoderna med svenska uttryck som i så stor utsträckning som möjligt beskriver de fenomen som utnyttjas. Det finns ett stort antal apparater man kan köpa som baseras på en viss aspekt av vågutbredningen. Om man slår till en betongyta uppstår samtidigt alla de seismiska vågutbredningsfenomenen som de olika apparaterna utnyttjar. Med olika förfarande kan de oönskade effekterna undertryckas.

5.2 Tillämpningsområden för OFP vid tillståndskontroll i reaktorinneslutningar

Konstruktionens geometri, överensstämmelse med handlingarna

Här gäller det att fastställa geometriska egenskaper som tvärsnitt, täckskikt och armeringens läge. Det senare blir av stor betydelse om man behöver ta ut borrhärdar för kompletterande undersökningar.

Praktisk användning: Metoder lämpliga för detta är radar, stående vågor, skjuvvågsreflektion, röntgen och täckskiktmätare. Av dessa metoder alstrar enbart röntgen bilder. Med fördel kan de metoder som inte alstrar bilder monteras på en skanner för att möjliggöra framtagning av bildmaterial (10). Då detta leder till tidsödande undersökningar bör sådana begränsas till kritiska tvärsnitt. Stående vågmätningar har visat sig mycket effektiva för att bestämma betongens tjocklek utanför stålplåtsinneslutningen (13), då det uppstår närmast total reflektion mot detta gränssnitt. För att stående vågmätning skall ge önskat resultat fordras även en våghastighet, vilken kan bestämmas med ytvågsseismik. Dessa operationer kan i realiteten utföras samtidigt, då en stående vågeffekt ofta uppstår vid ytvågsmätning i betongkonstruktioner med MASW-metoden.

Utvecklingsmöjligheter: Man bör analysera skjuvvågsreflektionsmetoden för att skapa större klarhet kring varför den ryska apparaten fungerar så bra. Den introducerar nämligen två begrepp samtidigt, horisontellt polariserade skjuvvågor samt sändare och mottagare som baseras på grupper av element. Vilket fenomen som är avgörande är idag okänt. Elementgrupper för impedansmätning introducerades i (18).

Hållfasthetsreduktion i den homogena betongen, åldring, utmattnings

I (11) anges att åldring är ett oprecist begrepp som är i behov av en exaktare definition. I denna kategori inräknas kemiska angrepp, t ex alkali-

kiselreaktioner (AKR). I bakgrundsmaterialet är det väl endast elektrisk potential och galvanostatiska metoder som kan sägas ha en implikation mot kemiska förändringar som sådana. Det intressanta är emellertid vilken hållfasthetsreduktion kemiska förändringar kan leda till och då kommer seismiken (8) och hastighetsbestämningar med ultraljud att vara de främsta metoderna. Det är nämligen endast dessa som har en fysikalisk bakgrund i vilken hållfasthetsrelaterade parametrar som elasticitetsmodul och Poissons tal ingår (5). Ultraljudbaserade metoder har emellertid visat sig ha problem med sprickor i ytan. Det är per definition omöjligt att fastställa ett materials brotthållfasthet med oförstörande provningsmetoder så någon form av parameterkorrelation är nödvändig.

Praktisk användning: De seismiska metoderna som har störst relevans är ytvågs-mätning och refraktionsmätning vilka har möjlighet att ge information om våghastigheten som funktion av djupet under betongens yta. Även om det har gjorts många försök, finns det inte generellt framtagna samband mellan våghastighet och brottspänning. För en given konstruktion blir sambanden starkare, varför det är av stort värde om man börjar samla in våghastighetsdata redan när konstruktionen är nyuppförd. Man kommer då att kunna följa den inledande hållfasthetstillväxten, kanske pricka in maximum och sedan beskriva hastigheten med vilken hållfastheten avtar. Man torde kunna koppla hög varians i våghastighet till hög varians i brotthållfasthet för vilken konstruktion som helst. Sådan information bör vara väsentlig när man räknar på brottsannolikheter.

Utvecklingsmöjligheter: Främst ser man kanske fördelarna med att kunna skanna ytvågsutrustning, vilket skulle underlättas om mätningarna sker med luftkoppling, dvs utan direkt kontakt med mätobjektet (10).

Reduktion av bärande tvärsnitt

De tvärsnittsreducerande skadorna är främst sprickor, armeringskorrosion och spjälkning/delaminering. De behandlas var för sig nedan:

- Sprickor

Detektion av sprickor i metall sker ofta med ultraljud. Genom att vågrörelsen måste gå en omväg kring sprickorna får man som resultat en skenbart lägre våghastighet. Ju mer våghastigheten reduceras desto djupare antas sprickorna vara. Inhomogeniteter i ett material innebär ofta att det beter sig olinjärt, dvs det uppstår övertoner om man exciterar objektet med en bestämd frekvens (10). Betongens olinjäritet har framgångsrikt kopplats till dess nedbrytningsnivå och återstående styrka (10). Övertonsdetektion är ofta mycket effektiv, då den kan ske med en signal från vilken den dominerande excitation-frekvensen filterats bort. Övertonsanalys utförs med monofrekvent puls- eller kontinuerlig excitering. Kopplat till en skannermetod kan övertonsanalysen ge den eftersträfvade informationen om sprickfrekvens i ett större område.

Praktisk användning: I rapportunderlaget beskrivs sprickor huvudsakligen som ett problem för de använda metoderna. Slutsatsen blir att ingen metod finns utvecklad för att beskriva sprickfrekvens i större betongtytor.

Utvecklingsmöjligheter: En skannad sensor baserad på olinjäritet i sprickrik betong är ett angeläget utvecklingsprojekt.

- Hålrum

Om betongen är av god kvalitet och maximal ballaststorlek < 25 mm anses skjuvvågsreflektion vara den bästa tekniken för detektering av hålrum och i vissa fall uppskatta deras storlek. Metoden är också bra för att bestämma betongtjocklek upp till 600 - 800 mm. Stående vågmätning är däremot inte känslig för ballaststorleken och kan tränga in många meter i betongen beroende på den höga energin i slagen. Den är dock inte lika bra på att detektera hålrum som ultraljudmätning med skjuvvågsreflektion. Den minsta storleken på hålrum eller spricka parallell med ytan som kan detekteras med stående-vågmetoden är normalt samma som mätdjupet, t ex 200 mm hålrum på 200 mm djup. Radarvågors inträngning i betong är normalt begränsad till 300 mm på grund av betongens höga konduktivitet åtminstone i nygjutet skick. Radar kan vara lämplig för detektering av hålrum i oarmerad och helst ganska torr betong. Mycket små hålrum (mindre än 20 mm) i betong upp till 1200 mm tjock upptäcktes lätt med högenergiröntgen (9).

Praktisk användning: De metoder som direkt kan användas för att lokalisera även mindre hålrum är högenergiröntgen och i viss utsträckning skjuvvågsreflektion.

Utvecklingsmöjligheter: Ett projekt fokuserat mot att förklara varför den ryska skjuvvågsreflektionsapparaten fungerar så bra är angeläget, vilket redan antytts.

- Korrosion i slakarmering

Det finns flera olika instrument utvecklade för att detektera armeringskorrosion, den galvanostatiska metoden diskuteras t ex i underlaget (8). Problemet förefaller emellertid inte att prioriteras högt (1) i vattenkraftsammanhang. Akustisk emission påstås kunna avlyssna de knäppningar som uppstår när korrosionsprodukterna genom volymexpansion skapar sprickor i betongen runt armeringsstängerna.

Praktisk användning: Enda indikationen i rapportunderlaget är galvanostatiska metoden.

Utvecklingsmöjligheter: Då problemen inte tycks rankas högt i branschen utpekas ingen sådan metod.

- Spjälkning och delaminering

Delaminering har historiskt konstaterats genom sk bomknackning (i USA chain-dragging). Metoden bygger på att ljudet från slaget får en dovre ton när delaminering föreligger. Orsaken till detta är att betongen uppträder mjukare där den är delaminerad. Det innebär att den mekaniska ytimpedansen är lägre. Impedansmätning sker genom att man mäter kraft och acceleration när man slår till eller forcerar vibration i betongytan. Impedansen beräknas som kraften dividerad med hastigheten, den senare fås oftast genom att integrera den uppmätta accelerationen. Andra metoder att konstatera delaminering eller spjälkning bygger på att det uppträder reflexer vid skadan. Stående vågmätning och skjuvvågsreflektion är exempel på sådana metoder. Slutna horisontella sprickor kan emellertid inte detekteras med skjuvvågsreflektion (8). Frekvensrespons (18) vid impulsexcitering är också en möjlighet, då resonansfrekvensen i betongytan sjunker när delaminering föreligger. Frekvensresponsmätningar har framgångsrikt kombinerats med skanner för framställning av bilder över delaminerings utsträckning (18).

Praktisk användning: Frekvensrespons.

Utvecklingsmöjligheter: Det kan finnas förutsättningar att utveckla metoder för kontaktlös excitering av betongytan och bestämning av impedansen. I så fall påminner det om liknande ansträngningar att åstadkomma kontaktlösa ytvågsmätningar och bör utvecklas gemensamt.

Kraftförlust i spännkablar

Kraftförluster i spännkablar kan uppstå momentant genom att enskilda kablar går av samt kontinuerligt genom krypning, krympning, relaxation och tvärsnittsreduktion genom korrosion (20). Det finns utvecklade metoder och instrument för att med ultraljud bestämma spännkraften i bultar och denna princip borde kunna överföras till spännkablar. Det är känt att man med akustisk emission kan avlyssna de skrapljud som uppstår mellan spända och ospända filament i en spännkabel. Sådan detektering underlättas naturligtvis om konstruktionen är dynamiskt belastad, vilket väl reaktorinneslutningen inte kan sägas vara annat än vid de tillfällen då den utsätts för övertryck (11, 12) vid läckagetester. Indirekt kan man få indikation om risk för korrosion genom att hålrum konstateras i injekteringscementen inuti spännkabelrören, men även skjuvvågsreflektion borde kunna användas, därför att ekot från ett tomt spännkabelrör ingjutet i betong är starkare än ekot från ett cementfyllt rör beroende på den större impedansskillnaden. Emellertid finner man i (8) att skjuvvågsreflektion inte kan användas för kontroll av injektering i spännkabelrör.

Praktisk användning: Främsta metoden att konstatera hålrum i spännkabelrör är röntgen (8). Någon OFP-metod att bestämma spännkraften i kablarna framgår inte av rapportunderlaget.

Utvecklingsmöjligheter: Det går inte att peka på en en specifik metod som bör utvecklas i detta syfte, så rekommendationen är att själva problematiken studeras. Lämpligen kan man då börja med att studera apparater för bestämning av spänning i bultar med ultraljud och försöka överföra erfarenheterna till spännkablar. Dessa kan troligen fungera som vågledare och detta fenomen bör kunna utnyttjas för såväl bestämning av spännkraft som brister i injektering av spännkabelrören.

5.3 Sammanfattning avseende tillståndskontroll

Praktisk användning:

- Radar (Konstruktionens geometri)
- Stående vågor (Konstruktionens geometri)
- Högenergiröntgen (Konstruktionens geometri, Hålrum, Spännkablar)
- Ytvågsseismik (Konstruktionens geometri, Hållfasthet)
- Skjuvvågsreflektion (Konstruktionens geometri, Hålrum)
- Täcksiktmetare (Konstruktionens geometri)
- Refraktionsseismik (Hållfasthet)
- Galvanostatik (Korrosion)
- Frekvensrespons (Spjälkning/delaminering)

Utvecklingsmöjligheter:

- Skjuvvågsreflektion (Konstruktionens geometri, Hålrum)
- Kontaktlösa ytvågsmätningar (Hållfasthet)
- Detektor för olinjäritet (Sprickor)
- Impedansmätning (Spjälkning/delaminering)

- Spännkablar som vågledare (Spännkablar)

Detta innebär att alla metoder som utpekats ha utvecklingsmöjligheter baseras på vågutbredningsfenomen för mekaniska vågor, vilka har en fysikalisk koppling till hållfasthetsparametrar. De fyra första metoderna bör utvecklas så att de kan skannas och därmed alstra bilddata. Flera av de metoder som är klara för praktisk användning skulle även de ge ett värdefullare resultat om de anpassas för skanning.

Av Bilaga 1 framgår de flitigast använda metoderna i bakgrundsmaterialet:

- Radar (9x)
- Högenergiröntgen (9x)
- Ytvågseismik (7x)
- Stående vågor (6x)
- Skjuvvågsreflektion (5x)

urvalet får anses avspegla de erfarna operatörernas bedömningar av de för betong mest relevanta metoderna, varvid man bör observera att allt material inte avser reaktorinneslutningar. Radar och högenergiröntgen kommer att utvecklas oavsett svenska utvecklingsinsatser och därför utpekats dessa metoder av kostnadseffektivitetsskäl inte som lämpliga för sådana insatser. Stående vågor är ett fenomen som nästan alltid uppträder vid alstring av mekaniska vågor i betongkonstruktioner och alstras alltså inte särskilt av någon speciell apparat. Därför pekats inte heller denna metodik ut som utvecklingsbar.

5.4 Rekommendationer avseende utveckling av tillståndskontroll

Grundläggande litteraturstudier

Fysikaliskt grundade samband mellan hastighet för skjuvvågor respektive kompressionsvågor och E/G-moduler respektive Poissons tal finns, men det föreligger inte något teoretiskt utvecklat samband mellan någon storhet som kan mätas, utan att förstöra objektet, och brotthållfasthet. Dock finns flera sådana studier som leder till empiriska samband och en litteraturgenomgång skulle ha stort värde. En likartad studie bör genomföras avseende olinjäritet i betong som en kvalitetsbedömningsmetod, då man kan förvänta sig att detta område inte är jungfruligt, i varje fall inte avseende andra material än betong.

Sensornormering

Det kommer att vara av stort framtida värde om det skulle vara möjligt att standardisera vilken typ av sensorer som skall användas för de olika apparaterna / metoderna. Detta är kanske ett uppdrag som skulle läggas ut på CBI Betonginstitutet AB, som från årsskiftet 2007/2008 är SP:s och CBI:s gemensamma bolag för betongfrågor. Syftet med en sådan normering är att det skall vara möjligt att dra slutsatser från mätningar i en anläggning när man utvärderar en annan. Jämförbarhet är naturligtvis också av utomordentligt stor vikt i tidsserier, särskilt när man tvingas byta sensor när en gammal upphör att fungera.

Skannersystem för reaktorinneslutningar

I (10) diskuteras flera metoder att avsöka en yta automatiserat. Huvuddelen av en reaktorinneslutning är en enkelkrökt yta, vilket gör att ett skannersystem kan utformas som en vertikal linjärenhet upphängd på en enkelkrökt räls. Sådan utrustning bör utvecklas, gärna i samband med något företag som specialiserat sig på denna typ av materiel. Främsta hindret mot användning av enkla skannersystem är de installationer som finns i de rum som omger reaktorinneslutningen. En helt annan typ av skannersystem kan baseras på en liten industrirobot som kan programmeras att ha unika avsökningsstrategier anpassade till de installationer som finns i varje rum. Erfarenhet av några enkla skannersystem finns vid LTH (17,18) men ett företag med solid erfarenhet av elautomatik och elektromekanik bör anlitas för att bygga ett optimerat skannersystem, kontrollerat av en styrdator som också kan sköta datainsamlingen för aktuella sensorer på skannern.

Skjuvvågsreflektion (Konstruktionens geometri, Hållrum)

Utvecklingsinsatser bör främst fokuseras på att förklara om det är skjuvvågorna eller flerementanvändandet som gör att den ryska skjuvvågsapparaten fungerar så bra. Är det antalet element som är avgörande bör tester med kompressionsvågor och flera element för sändning och mottagning utföras. Orsaken till detta är att ett skannat system endast med svårighet kan överföra skjuvvågor till betongytan. Elementen måste ju ha en hög friktion mot betongen för att kunna överföra en partikelrörelse parallell med ytan och denna friktion gör det problematiskt att förflytta elementen från mätpunkt till mätpunkt i ett skannat system. Sensorn måste i så fall lyftas upp innan förflyttning till nästa mätposition, varefter den måste pressas mot betongytan osv.

Kontaktlösa ytvågsmätningar (Hållfasthet, eventuellt även sprickor)

Den valigaste metoden att genomföra ytvågsmätningar på en betongyta är Multichannel Simulation with One Receiver (MSOR) kombinerat med Multichannel Analysis of Surface Waves (MASW). MSOR-proceduren innebär att en accelerometer fästs mot betongytan och att hammarslag appliceras med jämna avstånd utgående från accelerometern. Detta är ekvivalent med att ha en källa och flera mottagare - MASW, men leder till ett mycket enkelt mätsystem. Främsta kravet för att MSOR skall vara framgångsrikt är att hammarslagen är repetitiva. Denna procedur är emellertid inte möjlig att skanna, främst beroende på att accelerometern måste fästas mot ytan. Därför har försök inletts med att mäta upp vågrörelsen med mikrofoner. Det finns system som baseras på laser för att överföra en mekanisk impuls till betongytan, men det är mindre problematiskt att skanna en impulsgivare som slår an betongytan. Däremot är det svårt att få sådana slag repetitiva. Detta kan man komma runt genom att utnyttja flera mikrofoner, i vilket fall kravet på repetitivitet i slaget försvinner. Priset är att man måste ha en mer komplicerad datainsamlingsutrustning, kanske med 10-20 kanaler.

Detektor för olinjäritet (Sprickor)

Enda referensen till denna metod i bakgrundsmaterialet finns i (10). Metoden är i princip enkel. Testobjektet sätts i vibration vid frekvensen f och därefter lyssnar man på frekvenserna $N \times f$, $N = 2, 3$ etc. Även lägre frekvenser än f kan uppstå genom olinjäritet vid pulsexcitering. För att öka dynamiken i mätningarna bör frekvensen f filtreras bort innan digitalisering. När den litte-

raturstudie som nämns ovan utförts, bör en lämplig sensor konstrueras och försök inledas. Det är oklart om den typen av mätningar kan ske med enpunktsförfarande eller om det krävs att det är separation mellan sändare och mottagare. I ett enpunktsförfarande måste man sända separat i tiden från mottagning medan man i ett tvåpunktsförfarande kan sända och mottaga samtidigt. Troligen kan samma typ av transducer användas både för sändning och mottagning. Enpunktsförfarande kräver ett skannersystem för att bli yteffektivt medan tvåpunktsmätningar direkt ger en viss yttäckning vid varje uppställning. Som signalkälla borde i inledande försök ett vanligt ekolod kunna fungera medan mottagarsidan kan utgöras av en laptop med lämplig datainsamlingshårdvara. Utomlands pågår forskning inom detta område och man har framgång med sprickdetektering i betongprovkroppar. Tillämpning på verkliga konstruktioner har visat att det också uppstår olinjära fenomen i kontakten mellan betong och armering, vilket utgör en komplikation.

Impedansmätning (Spjälkning/delaminering)

Impedansmätning sker, som tidigare nämnts, genom uppmätning av kraft och associerad hastighet i en punkt där vibration forceras med en teknisk anordning, t ex en elektromekanisk vibrator. Denna typ av mätning är väl utvecklad inom strukturakustiken och företag som t ex Brüel & Kjaer tillhandahåller kvalificerad utrustning för mätning på byggnadsdelar. En utvecklingsinsats avser främst att sätta samman en apparatur lämplig för skanning av en betongyta. De ytor som kan komma ifråga för sådana mätningar är mycket stora. Det kan t ex röra sig om in- och utloppskanaler och då måste man kunna söka av tusentals kvadratmeter effektivt. I ett sådant objekt tillkommer önskemål om att kunna utföra mätningarna under vatten och då gärna från en undervattensrobot med kabelstyrning eller ännu hellre en autonom variant. Relativa impedansförändringar låter sig lätt göra på avstånd genom luft, vatten eller annat homogent material med känd impedans. Om man sänder en kort ljudpuls mot ytan kommer den att reflekteras. Reflexens styrka kommer att indikera dels avståndsförändringar och dels impedansförändringar, eftersom det finns ett enkelt samband mellan reflektionskoefficient och impedans. Då pulsekomatningen är en vanlig metod att mäta avstånd bör den del som orsakas av variation av reflektionskoefficienten lätt kunna beräknas med kännedom om spridningsegenskaperna för sändaren. Det klassiska instrumentet för impedansmätningar är rörapparaten men mätningarna kan också ske med ett riktningssselektivt mikrofonpar vid sk intensitetsmätningar. En intressant fråga att studera är hur stort detektionsdjup i betong man får för olika frekvenser i luft respektive vatten.

Spännkablar som vågledare (Spännkabelkraft)

Ett spännkabelprojekt pågår för närvarande vid LTH Konstruktionsteknik under ledning av Doktorand Peter Lundqvist. 3 m långa balkar med ingjutna spännkabelrör har tillverkats och kommer att förvaras i klimatrum. Återkommande testning kommer att utföras under ett antal år för att se vilka spännkraftförluster man får. Vissa spännkabelrör kommer att vara cementinjekterade andra kommer att injekteras med fett. Systematisk uppmätning av våghastigheter i dessa spännkablar planeras och kan ge ett intressant samband mellan kraft och våghastighet. Studier av liknande slag har genomförts utomlands på *injekterade* spännkabelrör och man har funnit att vid optimala frekvenser (några hundra kHz) är dämpningen så hög att signalen dött ut efter

några meter. Man har då mätt på det centrala elementet i kabelbunten, den som är rakast. Försök att excitera kablarna med hammarslag har inte varit framgångsrika, då det alstrar för låga frekvenser. Krökta kablar liksom böjda bergbultar förstör det goda samband man annars kan konstatera mellan våghastighet och spänning i materialet. Situationen för oinjekterade kablar är inte lika väl utredd. Det vore intressant att utföra en undersökning av vilka frekvenser som utbreder sig med lägst förluster i oinjekterade spännkablar. Därvid bör man särskilt studera vilka frekvenser som lättast tas upp från omgivande betong. Ytterligare en studie kunde vara att se om vågutbredning i spännkablar kan kopplas till ofullständig injektering i spännkabelrören även om mätsträckan kan antas vara begränsad pga dämpningen. Vågimpedansen i ett wirefilament kommer att förändras i ett sådant gränssnitt där filamentets omgivning ändras från cement till luft. Det ger upphov till en reflex. Det är möjligt att kontinuerlig excitering av wirarna kan öka mätsträckan. Time Domain Reflectometry - TDR (19) kan beskrivas som radar på ledning. Metoden används för att t ex finna kabelbrott i koaxialkablar, vilka starkt påminner om ett spännkabelrör. Dock är kablarna inte isolerade från spännkabelröret. Hade så varit fallet kunde brister i injektering lätt ha bestämts.

6 Övervakning

6.1 Övervakning av reaktorinneslutningar

Bakgrund

Övervakning sker kontinuerligt medan tillståndskontroll utförs under begränsad tid (15). För övervakning gäller generellt att iaktta, analysera och dokumentera. Dokumentation av små, för sig själva kanske obetydliga händelser kan i ett senare sammanhang visa sig vara värdefulla då de kan ange tidpunkten för inledningen av en trend, som därmed kan kopplas till en känd händelse och på så vis förklaras. Vid övervakning önskas information om både korttids- och långtidsförändringar.

Övervakning bör göras med metoder som har hög driftsäkerhet samt är känsliga för förändringar av mätvariablerna. Mätssystemen måste också vara stabila så att endast verkliga tendenser registreras. Mätningar och lagring av mätdata kan datoriseras på plats med möjlighet till central datainsamling, via modem eller nätverk för vidare bearbetning. Likaså kan larmnivåer läggas in. Om dessa överskrids utsänder mätssystemet information till driftcentralen.

Det är av stort värde att ha tillgång till de tidsserier kontinuerliga mätningar genererar. Genom dessa får man så småningom ett utmärkt statistiskt underlag för att beskriva den normala variationsbredden som funktion av årstid och driftförhållanden. Med detta material i bakgrunden blir det möjligt att ha vetenskapligt baserade larmnivåer i form av tvingande regler baserade på statistiskt beräknad avvikelse från det normala för viss årstid och visst driftförhållande. Detta har visat sig vara av stor betydelse då krypande förändringar lätt nonchaleras eller bortförklaras, om man lämnar till människan att avgöra om larm skall ges, se "Blandarhändelsen" (16). Där visas övertygande att det krävs en 1000-faldig ökning av risknivån för att ett cost-benefit resonemang skall leda till att man stänger av en reaktor för att undersöka en konstaterad händelse.

Värdet av långa tidsserier illustreras av klimatdebatten och sådana serier tillhör det viktigaste vi kan lämna över till kommande generationer.

Smarta strukturer är en beteckning på t ex anläggningar med i betongen ingjutna sensorer. Detta diskuterades vid planeringen av de nya kärnkraftverken i Finland, men man avstod slutligen. Ett problem är att sensorer som går sönder inte kan bytas ut.

Vilka metoder är då lämpliga för långtidsövervakning av en reaktorinneslutning? I (15) genomförs ett sådant resonemang avseende fyllningsdammar (jorddammar). En viktig urvalsparameter är att den registrerade parametern skall ha hög känslighet för det studerade fenomenet. Vad gäller kärnkraftinneslutningars hållfasthet pekar detta på att valet måste bli baserat på mekaniska vågutbredningsfenomen. Orsaken till det är att fenomenen baseras på samma materialparametrar som hållfasthetsberäkningar. Det måste också

vara så att lösningen är yteffektiv, dvs en sensor måste kunna täcka in mer än sin närmaste omgivning, vilket motiveras av att reaktorinneslutningen, som nämnts, har en yta uppgående till 3000 m².

Akustisk emission

I (11,12) redovisas mätningar med akustisk emission i samband med provtryckning av en modell av en reaktorinneslutning (MAEVA) i Frankrike. System för övervakning med akustisk emission är väl utvecklade och är kommersiellt tillgängliga. Speciellt finns det mycket sofistikerad mjukvara, vilken direkt kan räkna fram läget av källan till en akustisk emission. Då emissionerna ofta är mycket högfrekventa dämpas signalerna snabbt i betong, vilket leder till att en sensor bara har några meters influensområde. Det rapporteras framgångsrika försök att öka sensorernas influensområde genom att fästa vågledare på det undersökta objektet. Sådana vågledare är potentiellt redan installerade i reaktorinneslutningarna i form av de ingjutna spännkablarna. Hur det står till med den saken är en intressant studie som bör genomföras.

Aktivt seismiskt nätverk

Man kan tänka sig att man placerar ut egna sändare, vilka på förutbestämda tider och platser sänder ut en signal. Denna behöver då inte vara så högfrekvent som brottmekanism-baserade emissioner är. Därmed uppnår man lägre dämpning av signalerna och således större detekteringsavstånd för sensorerna. Eftersom källans läge i sådana fall är känt är det oproblematiskt att räkna fram gånghastigheter längs olika sträckor i inneslutningen. Man kan tänka sig ett tomografiskt förfarande där sändare och sensorer är utplacerade så att relativt god måttäthet erhålles. Det är också möjligt att använda samma element både som sändare och mottagare om dessa t ex baseras på en piezoelektrisk transducer. Innan försök med denna metod måste man studera vilka frekvenser som utbreder sig optimalt i reaktorinneslutningens delar, t ex betongen innanför och utanför tätskiktet av stålplåt. Ett sådant seismiskt nätverk som här beskrivs ger ju också en grov tillståndskontroll, så det utgör en brygga mellan övervakning och tillståndskontroll.

Modanalys

Ytterligare en metod att övervaka en reaktorinneslutning kontinuerligt är modanalys (20). Reaktorinneslutningen är enligt uppgift fristående den omgivande betongkonstruktionen. I korthet går modanalys ut på att en betongkonstruktions resonansfrekvenser förändras om det uppstår en förändring i dess integritet eller styvhet. I princip skulle det då vara tillräckligt att mäta i en punkt om det inte råkar vara en nod, men det är inte säkert att lokala förändringar ger sig till känna på andra sidan inneslutningen. Därför blir det troligen aktuellt att placera ut flera sensorer. Då det finns många vibrerande maskiner i ett kärnkraftverk kan man som hypotes anta att konstruktionen är permanent exciterad och att man kan utnyttja detta spektrum som mätstorhet. Det innebär i så fall att man inte behöver speciell utrustning för att excitera inneslutningen. Å andra sidan kan man inte identifiera frekvenstoppar som konstruktionens resonansfrekvenser utan får nöja sig med att studera om nya toppar dyker upp eller gamla försvinner. Här rör det sig om vibrationer vars våglängder är i paritet med konstruktionens mått och alltså är böjvägor.

Kombinationer

Det skulle gå utmärkt att kombinera mätningar av akustisk emission med ett aktivt seismiskt nät. Man skulle även kunna lägga till modanalys. Det är möjligt att de sändare som används för det seismiska nätet även skulle kunna fungera som sensorer för modanalys. Tillvägagångssättet blir då att akustisk emission övervakar kontinuerligt medan man vid jämna mellanrum gör en mätning med det seismiska nätet och med modanalys. Eftersom de tre metoderna sannolikt skulle komma att utnyttja olika frekvensområden kan de, med hjälp av filtrering, även pågå samtidigt utan att störa varandra, om man bortser från de perioder när aktiv sändning sker i det seismiska nätet. Uppskattningsvis ligger all modal signal under 1 kHz, all signalering i det seismiska nätet mellan 1 och 100 kHz samt akustisk emission högre än 100 kHz, den senare uppgiften naturligtvis osäker.

6.2 Rekommendationer avseende utveckling av övervakning

Förberedande undersökningar

I syfte att klargöra möjligheterna till akustisk övervakning av en reaktorinneslutning är det nödvändigt att studera det akustiska spektrum som finns i inneslutningen som konsekvens av den dagliga driften. Sådana undersökningar bör täcka frekvensområdet upp till 100 kHz. Det innebär att man kommer att behöva accelerometrar för minst två frekvensområden, då det är ovanligt att accelerometrar som kan registrera signaler i det lägsta frekvensområdet 0-1 kHz även klarar de högre frekvenserna. Samtidigt bör man genom kontrollerad excitering av inneslutningen fastställa för vilka frekvenser signalerna utbreder sig optimalt i inneslutningens olika betongskikt. Även de befintliga signalerna i spännkablar bör mätas upp liksom vilka frekvenser som plockas upp och utbreder sig optimalt i dessa. Enligt (10) finns det på KTH en modell av en reaktorinneslutning, vilken skulle kunna utnyttjas för tester av de föreslagna metoderna.

Akustisk emission och aktivt seismiskt nätverk

Standardinstrument för mätning, registrering och analys av akustisk emission finns kommersiellt tillgängliga, varför eventuella forskningsinsatser bör koncentreras mot möjligheten att parallellt utnyttja apparaturen för att registrera aktiva signaler från styrda sändare. Ett sådant projekt samordnas lämpligen med en studie av hur ett seismiskt nät skall utformas mot bakgrund av de mätningar som gjorts vid de förberedande undersökningarna.

Modanalys

Modanalys är ett utvecklat begrepp och erfordrar inte i sig några utvecklingsinsatser därför att tillämpningen är kärnkraft. Möjligen skulle en teoretisk studie av svängningsmoder för oskadad respektive skadad, med olika skadefall, reaktorinneslutning kunna vara av värde för att se på vilken nivå avvikelserna är detekterbara mot den inledningsvis uppmätta bakgrundsnivån.

7 Tänkbara utförare av utvecklingsinsatser

De institutionella aktörer man först kommer att tänka på i samband med OFP i betong är SP/CBI, vilka sedan årsskiftet 2007/2008 samverkar. I denna organisation tillämpas OFP liksom inom VRD AB (Vattenfall Utveckling) där även utveckling av OFP-metoder för tillämpning i betong utförts (19) avseende optisk övervakning av spricktillväxt och deformationer i grova betongkonstruktioner. Vid SP/CBI utvecklas apparatur för mätning av korrosionshastighet och man intresserar sig också för smarta strukturer och har tankar mot akustisk emission.

På högskolesidan har Lunds Tekniska Högskola / Teknisk Geologi bedrivit utvecklingsarbete avseende OFP i betong främst avseende radar och metoder baserade på mekaniska vågutbredningsfenomen - seismik (17,18), båda metoderna i kombination med skannersystem, vilka också utvecklats vid LTH. Orsaken till ämnet Teknisk Geologis intresse för betong är att ämnet även omfattar geofysik, vilket i princip är en storskalig tillämpning av OFP-metoder. Vissa av dessa metoder låter sig anpassas till mätningar i betong. Utvecklingen inom ytvågsseismik är just nu mycket stark vid ämnet, vilket har lett till att Sverige förfogar över utvecklingskapacitet på detta område som tveklöst ligger i den absoluta forskningsfronten, varför det är motiverat att göra ett speciellt utpekande av lämplig utförare, även om det rör en person vid författarens ämne. Tekn Dr Nils Rydén LTH/PEAB är ytterst väl insatt i ytvågstekniken och har t ex introducerat den hos Force Technology. Som framgår av (13) har Rydén också deltagit i mätningarna i reaktorinneslutningar på uppdrag av detta företag. Rydén har också ett välförgrenat internationellt kontaktnät till andra ledande aktörer. Teknisk Geologi är sedan något år ett ämne under Institutionen för Elektrisk Mätteknik, där bl a ultraljudmätning av hjärtverksamhet och bläckstråleskrivaren tidigare utvecklats. Sonarutveckling och undervattensteknik, bl a videodokumentation, är två andra intresseområden vid Teknisk Geologi, som kan ha relevans för aktuella problemställningar inom det kärnkrafttekniska betongprogrammet.

Vid LTH har ämnet Konstruktionsteknik, professor Sven Thelandersson, forskningsprojekt avseende kraftförluster i spännkablar inom Elforsks kärnkrafttekniska betongprogram(BET 001). Nils Rydén samarbetar med inblandad personal. Även Byggnadsmaterial , Professor Lars-Olof Nilsson, har projekt inom detta program (BET 005), nämligen avseende gasinträngning i betong innanför tätplåten.

Uppsala Universitet / Teknikum har utfört en del utvecklingsarbete med OFP-metoder på initiativ av VRD AB, men där pågår inget sådant arbete för närvarande, utan man intresserar sig för *smarta strukturer*, konstruktionselement med inbyggda sensorer och aktuatorer, vilka automatiskt kan skapa en önskvärd effekt, t ex bullerminskning, känt t ex från aktiva paneler i SAAB-Fairchild flygplan.

Tillämpning av OFP metoder för analys av betong förekommer rimligtvis på många av de tekniska högskolornas konstruktions- och materialämnena, men det har inte gått att få fram från de intervjuade personerna att det också bedrivs *utvecklingsarbete* avseende dessa metoder vid någon institution.

Det är känt att det finns kompetens avseende mekaniska vågutbredningsfenomen på KTH, professor Anders Bodare på Institutionen för Jord- och bergmekanik. Sensorinstallation på stora betongkonstruktioner, nya Svinesundsbron t ex, har utförts av Brobyggnad på KTH, professor Håkan Sundquist. Sannolikt har man där också arbetat med modanalys.

Kompetens avseende grova betongkonstruktioner finns inom FOI. Projektilers och bombars inverkan på sådana konstruktioner har studerats vid anläggningen i Grindsjön. Lennart Ågårdh som arbetade med modanalys var medlem i Gruppen för Oförstörande provning (Bilaga) av Betong på 90-talet, då anställd vid SP. Lennart Ågårdh övergick senare till FOA sedermera FOI.

Det finns ett stort antal aktörer inom OFP, vilket framgår av medlemsförteckningen (Bilaga) för Föreningen för Oförstörande Provning - FOP. Ingen av dessa är specialiserade på betong, men det kan finnas kompetens som kan utnyttjas.

8 Diskussion

Först och främst måste påpekas att målsättningen (Kapitel 2) har varit given med uppdraget och att rapportunderlaget definierar informationen tillsammans med författarens befintliga kunskaper. Något försök att leta i litteraturen för att skapa ett bredare underlag ryms inte inom uppdraget, det skulle vara ett åtagande av helt annan dignitet. Internationellt pågår nämligen, som inledningsvis nämnts, en intensiv verksamhet inom det aktuella området. Det har t ex nu anordnats 6 internationella konferenser med treårsintervall inom det mycket snäva området "Non Destructive Testing in Civil Engineering" - NDT CE. Den senaste var 2006 i St Louis och samlade 66 bidrag. Inledningsanförandet i den senaste konferensvolymen har titeln "35 years of NDE of Concrete - a UK Perspective". Det finns också en konferens som kallas EC-NDT som är mer generell, men innehåller ett specifikt betongkapitel. EC står här för European Commission och konferensen återkommer med fyraårsintervall, senast i Berlin 2006.

Författaren har efterfrågat och fått synpunkter från representanter för branschen på ovanstående kapitlen 1-7. Dessa synpunkter tas upp till diskussion i en slags dialogform i detta avsnitt. Svaren i detta kapitel reflekterar författarens kunskaper och åsikter och är inte generellt hämtade från rapportunderlaget. Man kan säga att här slutar allmän väg och en viss agitation från författaren tillåts förekomma.

8.1 OFP har många gånger inte motsvarat de förväntningar man haft!

Tvivalsutan förekommer det att utförare av OFP gör större utfästelser än vad som sedan visar sig möjligt att genomföra. För att undvika detta är det nödvändigt att såväl beställare som utförare har inte bara ett gemensamt språk i dessa frågor utan också att beställarens förväntningar är realistiska och att han förstår på vilket sätt en OFP-undersökning skall användas. På samma sätt måste OFP utövaren sätta sig in i hur konstruktören resonerar och vilken information som är av intresse för honom. OFP är en diagnosmetod med vars hjälp man kan planera mer specifika insatser. Man gör ofta klokt i att börja med billiga metoder som ger stor översikt och därefter fokusera på mindre ytor som undersöks med mer sofistikerade metoder.

Ett exempel kan hämtas från vägbanksundersökningar med radar. Geotekniker undrar om man kan mäta sättningar med cm-noggrannhet. Det kan man inte. Vad man däremot skulle kunna göra är att *på några minuter*, med några dm precision, tala om var längs en flera tusen meter lång sträcka vägkroppen tycks ha sjunkit ner i underlaget på en delsträcka av 5 m. Att göra något sådant med borring skulle medföra kostnader/tidåtgång både två och tre tiopotenser högre.

Författaren menar att man som konstruktör inte har friheten att specificera OFP-metodernas nödvändiga kapacitet, man måste utnyttja deras befintliga förmåga och försöka bidra till att den utvecklas. Sker inte det kommer metoderna inte att utvecklas på önskat sätt. Man måste göra kontroller för att kunna prioritera underhåll och beräkna säkerhet och oförstörande provning är den enda framkomliga vägen. Som för all geofysik gäller också för OFP att styrkan inte ligger i det exakta svaret i en oändligt liten och tveksamt representativ punkt utan i den större överblick man kan få utan att förstöra konstruktionen. Det går att framgångsrikt angripa giltigheten i enstaka tryckprovningar av betong från utborrade kärnor, vilket framgår av mätningarna i det finska kärnkraftverket Olkiluoto, där variationen i tryckhållfasthet visade sig ha ett 100-procentigt variationsintervall. Man måste då fråga sig vad varje enskilt tryckprov är värt.

8.2 Kan OFP bidra till att reducera säkerhetsfaktorerna?

Det finns inga direkta teoretiskt baserade samband mellan t ex ljudhastighet och hållfasthet som är giltiga för all betong. Men i en specifik betongtyp får man däremot fram sådana samband, då en given konstruktion rimligen är gjuten med en specifik och förhoppningsvis ensartad betong. Därigenom bör ett sådant samband kunna upprättas. Men det behöver man inte göra, eftersom det skulle kräva omfattande provtagning. Finns sambandet och det är någorlunda linjärt så bör spridningsmåttet i ljudhastighet vara proportionellt mot spridningsmåttet i hållfasthet. Om fördelningskurvan för hållfastheten därigenom kan antas smalare, så kommer den att överlappa fördelningskurvan för lasterna i mindre grad och därigenom kan en lägre säkerhetsfaktor användas. Hållfasthetens medelvärde får fortfarande skattas på samma sätt som man gör utan att använda sig av OFP. Detta resonemang förs i (A).

8.3 Kan OFP leverera den information som konstruktören behöver?

Det är inte bara konstruktören som behöver information. Rent juridiskt har inte konstruktören utan den för kärnkraftverket driftsansvarige sista ordet vad gäller vilka åtgärder som skall genomföras i en anläggning. Ansvarsfrågan vid en olycka gäller om den driftsansvarige har genomfört de åtgärder som står honom till buds. Är så inte fallet kan den driftansvarige inte försvara sig. Kan han visa att uppmätta trender inte var alarmerande går han fri i händelse av en olycka. Jämför blandarhändelsen (16) som ledde till att SKI anmälde ledningen för Barsebäck Kraft AB till åklagaren.

Reaktorinneslutningen är naturligtvis överstark, det finns uppgift om att belastningsnivån inte ligger högre än 10-20% av brotthållfastheten. Men hur skall man, endast beräkningsmässigt, kunna trovärdiggöra att man fördubblar drifttiden för en betongkonstruktion utan att tillföra en yttre kontrollmekanism, vilken tar fasta på faktisk undersökning av de verkliga förhållandena. Ett rent teoretiskt övervägande måste ju innebära att beräkningarna som gjordes i den ursprungliga designen var felaktiga, alternativt att man nu tolererar högre risk. Kan man göra fel en gång kan man göra fel två. Därför mäs-

te OFP-operatör och konstruktör sätta sig ner och gemensamt komma fram till hur de tillgängliga metoderna kan hjälpa konstruktören i hans beräkningsarbete. Om så inte sker kommer det inte att bli några framsteg. Att ställa krav som inte kan uppfyllas leder ingenstans. De ursprungliga konstruktionsberäkningarna baserades antagligen på tabellmässiga värden för hållfastheten på vald betongkvalitet, som antas gälla för hela konstruktionsdetaljen. I verkligheten kommer betongen inte att vara homogen och den osäkerheten läggs i säkerhetsfaktorer. Inhomogeniteten är ett problem som inte alltid uppmärksammas i numeriska beräkningar t ex med finita elementmetoden.

8.4 Vad är noggrannheten hos OFP-metoder? Kan man t ex skilja mellan 40 och 50 mm täckskikt?

Det kan finnas olika svar på om en metod kan skilja på 40 och 50 mm täckskikt. Menar man om man kan se 10 mm skillnad i täckskiktet i två punkter? Menar man täckskiktets exakta tjocklek i en given punkt eller kontinuerligt längs en 5 m lång sträcka? Kärnbörning kan ge besked i en punkt men är praktiskt ogenomförbart i det senare fallet. Radar kan beskriva täckskiktsvariationerna längs den 5 m långa sträckan, men inte med millimeterprecision. Detta har emellertid ingenting med radarn att göra utan det beror på att betong är ett inhomogent material i vilket fukthalten kan anta olika värden tämligen lokalt. Det påverkar radiovågornas utbredningshastighet. Två kärnbörningar längs sträckan placerade enligt radardatas min och maxvärde skulle ge den sökta informationen med stor noggrannhet. Tillåter man sig att extrapolera ett exakt punktvärde till en hel konstruktion gör man sig skyldig till fel som är vida större än de som erhålles med OFP. Återigen är det så att möjligheten att ta många prov, vilket endast är möjligt med OFP, ger säkrare medelvärden och bättre spridningsmått än ett fåtal prov med förstörande metoder. Vad gäller tryckprovningar är de i sig behäftade med stora osäkerheter på grund av betongens inhomogenitet. Man skulle behöva göra många tester på samma provkropp med olika orientering för att få ett stabilt medelvärde. Eftersom tillgången på provmaterial är ytterst begränsad kan man inte göra många realiseringar av proven. Till detta kommer att man bara kan testa varje enskilt prov vid ett tillfälle. Därför är det helt meningslöst att göra tidsserier baserade på provning av betongkärnor. Utan tidsserier vet man i stort sett ingenting om utvecklingen.

8.5 Eftersom det saknas generellt giltiga samband mellan ljudhastighet och hållfasthet kan man inte ge sig på en okänd konstruktion och bestämma dess egenskaper!

Författaren är av den uppfattningen att man ändå kan bestämma viktiga parametrar för en okänd konstruktion. Som tidigare nämnts kan man anta att en given konstruktion är gjuten med samma betongtyp. I annat fall är konventionella hållfasthetsberäkningar helt värdelösa. För en given betongtyp blir sambandet mellan hållfasthet och E-modul åtminstone bitvis linjärt. Det innebär att man kan beräkna ett spridningsmått för hållfastheten i en konstruktion. Vikten av detta kan lätt räknas ut. Beräkna t ex hållfastheten för en kub med

FEM-metod för två olika varianser för hållfastheten kring samma medelvärde. Randomisera hållfastheten i varje cell enligt antagen varians. Tips: Ingen kedja är starkare än dess svagaste länk. Av Figur 10.4.2 i Betonghandboken framgår det intressanta förhållandet att en liten relativ variation i E-modul, dvs ljudhastighet, innebär en betydligt större relativ variation i hållfasthet. Detta kan uttryckas som att ljudhastigheten är överkänslig för hållfasthetsvariationer.

Utöver detta kan man, om man har tillgång till kontinuerliga tidsserier av ljudhastighet i en betongkonstruktion, följa hållfasthetens utveckling. Eftersom det hela tiden rör sig om samma betong, kommer antagandet om bitvis linjäritet mellan hållfasthet och E-modul att leda till att en sjunkande ljudhastighet innebär en sjunkande hållfasthet.

8.6 Hur kan OFP-metoder baserade på olinjäritet bedöma den återstående styrkan när OFP-metoder inte kan uppskatta materialens hållfasthet?

Skrivningen om OFP-metoder baserade på betongens olinjäritet kommer från rapporten (10). Författaren kan inte bedöma bakgrunden eftersom uttalandet inte direkt är kopplad till någon refererad artikel. Vad gäller mikrosprickor inverkar de nog på lineariteten på samma sätt som ytsprickor. Det innebär att man kanske kan detektera dem som ett volymfenomen, dvs att de förekommer i en viss betongvolym, men att man inte kan detektera en enskild spricka. Man kan alltså inte "se" en enskild spricka utan den effekt den orsakar. Mätning av olinjäritet är mycket känsligare för kvalitetsvariationer i betong än ljudhastigheten är.

8.7 På vilket djup kan hålrum detekteras och kan hålrum i spännkabelrör detekteras?

I rapporterna uppges att hålrum belägna djupare än 300 mm endast kan detekteras med högenergiröntgen. Det uppges att 20 mm små hål kan detekteras med röntgen. Metoder som baseras på reflektion: radar, ultraljud eller stående vågor behöver bara tillgång till en sida av konstruktionen. Därigenom blir ett specificerat penetrationsdjup möjligt att applicera på en dubbelt så tjock konstruktion om båda sidor är tillgängliga. Röntgen däremot baseras på genomlysning och kräver alltid tillgång till två motstående sidor av konstruktionen. Den uppgivna penetrationen, i rapporterna 1200 mm, blir då densamma som största möjliga konstruktionstjocklek. Röntgen uppges vara den enda metod som kan detektera hålrum i injekteringsbruket inuti ett spännkabelrör.

Röntgen fungerar så att täthetsvariationer mellan källa och plåt registreras som en variation i svärtning av plåten. "Plåten" kan numera vara digital. De resulterande bilderna kan bli mycket skarpa. Enligt rapporterna kan källan ses som en punktkälla och det innebär att skuggningen av ett föremål växer ju närmare källan föremålet är och ju längre bort från föremålet plåten är belägen. Är föremålet inte beläget på "optiska axeln" för röntgenapparaten kom-

mer dess läge att förskjutas på plåten på grund av att strålkällan är punktformig. De nödvändiga korrektionsberäkningarna genomförs i rapporterna, så det finns rutin att hantera dessa avbildningsfel. Skulle man känna till föremålets dimensioner går det att beräkna läget inom konstruktionen, genom det på plåten projicerade tvärmåttet. För tunna konstruktioner kan man backa källan från betongens yta och på så sätt erhålla mer parallella strålar genom konstruktionsdetaljen, vilket leder till mindre avbildningsfel.

Det framförs i rapportunderlaget att radar inte kan användas på större djup än 300 mm. Kanske har man använt en mycket högfrekvent antenn för att kunna mäta närmare ytan med hög upplösning. Det finns också tecken på att en högfrekventare antens strålning lättare tränger genom ytarmering än en mer lågfrekvent antenn. Lågfrekventare antenn och torr betong medför större penetrationsdjup för radar.

Högenergiröntgen uppges kunna tränga genom 1200 mm tjock betong och ger bilder av spännkabelrör inom denna tjocklek. Röntgenmetoden kräver samtidig tillgång till motstående sidor av konstruktionen. Spännkabelrör som ligger i den betongen blir genomlysta och eventuella hålrum syns. De metoder som begränsas av 300 mm penetrationsdjup (radar) kan inte under några omständigheter se hålrum i spännkabelrör om rören är av metall. De akustiska metoderna bedöms inte klara hålrumproblematik i spännkablar.

8.8 Är utvecklingsmöjligheterna som presenteras författarens egna funderingar eller är de en sammanställning av referensernas förslag på utveckling?

Det är egentligen bara en rapport (10) som explicit ger rekommendationer om framtida utveckling. De rekommendationerna sammanfaller i stort sett med de som presenteras i tidigare kapitel, 1-7, optisk interferometri har inte tagits upp och ej heller syntetisk aperturteknik som rekommenderas i (10). Optisk interferometri förefaller inte kompatibel med den miljö som finns kring reaktorinneslutningen och vibrationsnivån där. Syntetisk aperturteknik gör att de karaktäristiska bågar (hyperboler) som indikerar t ex armeringsjärn i radarprofiler (2-D) förs ihop till en punkt. Därigenom minskar tolkningssäkerheten eftersom det finns störningar som kan vara punktformiga, men aldrig hyperboliskt formade. Om man skall göra tredimensionella bilder utifrån tvådimensionella undersökningar är syntetisk apertur / migration däremot nödvändig, eftersom bågarna annars kommer att skymma varandra.

8.9 OFP:s status? Kan det användas? Är slutsatser entydiga eller innehåller de förbehåll och undantag?

Vad gäller de problemområden som tagits upp i rapporterna kan man med fog säga att metoderna är användbara och ger tillförlitliga resultat om de används för de utpekade syftena. Att t ex uttala sig om E-modul utifrån radardata är inte möjligt på fysikalisk grund. Inte heller finns det minsta chans att se ofullständigt injekterade spännkabelrör med radar, då radiovågorna inte tränger genom metall. Det horisontella läget av armeringsjärn, sådant det beskrivs av radar, är exakt. Uppstår det fel beror det på slarv med positioneringen, inte

på radarmetoden. Liknande resonemang kan föras för de andra metoderna som tas upp, men då resonemanget är principiellt upprepas det inte för de andra metoderna.

8.10 Hur kan OFP ha utvecklingsmöjligheter om metoderna inte kan bestämma betongens hållfasthet?

Motfrågan är vilken metod som kan bestämma betongens hållfasthet? Utbörning av kärnor och efterföljande tryckprovning ger exakta värden, men på vad? OFP kan tillföra precision i medelvärden och spridningsmått som punktvisa, sk exakta mätningar, aldrig kommer ens i närheten av. De representerar möjligen ett precist värde i oändligt liten punkt som dessutom aldrig kan undersökas igen och därför inte har något värde i tidsserier. I själva verket är det omöjligt att fastställa ett spridningsmått på själva testmetoden om den förstör provena. Man skulle ju behöva testa samma prov upprepade gånger för att fastställa metodens spridningsmått.

8.11 Vissa diskussioner är generella, det skulle vara bra med en summering/diskussion angående OFP-metoders tillämpbarhet beträffande reaktorinneslutningen med utgångspunkt från de verkliga dimensionerna.

Författarens uppdrag är att redovisa och kommentera innehållet i rapporterna. Inte alla rapporterna handlar om reaktorinneslutningar. Det som står i sådana rapporter kan inte direkt appliceras på reaktorinneslutningar. De förslag författaren gör är emellertid fokuserade mot tillämpning på reaktorinneslutningar. Det är helt klart att man inte kan täcka reaktorinneslutningens 3000 m² stora yta med sensorer som har ett upptagningsområde på några dm². Men om man skall sätta ut 30-40 sensorer på ytan kan de väl också få fungera som mottagare för de frekvenser man associerar med akustisk emission.

8.12 Hur påverkar belastningen OFP-metodernas resultat?

Vad avser belastade sprickor kontra obelastade kan författaren inte erinra sig att det tagits upp i rapporterna. Författaren hade inte den frågan aktuell vid genomläsningen av de 1153 sidorna som rapporterna omfattar, så den kan saknas i sammanfattningen. Vad gäller olinjäritet, så är den beroende av att kompression och elongation över en spricka inte följer ett linjärt deformationssamband. Det innebär att en konstruktion med mikrosprickor utsatt för större tryckspänningar i sprickplanets normalriktning än de dragspänningar ljudutbredning ger upphov till, inte kommer att ge upphov till någon olinjär effekt. För ett statiskt belastningsfall måste man ju då förstås fråga sig hur sprickorna har kunnat uppstå. För ljudutbredning i ortogonala riktningen uppstår en olinjäritet genom friktion i sprickplanen.

8.13 Hur mycket data skall man samla in i syfte att övervaka en konstruktion?

Det är min erfarenhet att man inte kan säga att ju mer man mäter desto bättre är det. Man måste ha en klar uppfattning om hur mätresultat skall användas för att inleda en mätserie. Annars är det inte ovanligt att man i framtiden upptäcker att den då utvecklade beräkningstekniken kräver tillgång till data man inte har samlat in. Alltså först bestämma hur data skall användas, därefter vilka som behöver samlas in. Om man bara skall mäta en parameter ligger ljudhastighet nära till hands. Temperaturen påverkar fukthalten och fukthalten påverkar ljudhastigheten som framgår av rapporterna (13,14). Ljudhastigheten ökar med ökande fukthalt i betongen.

8.14 Är OFP metoderna ekonomiskt nödvändiga eller kan underhållet skötas ändå?

Det är nog så att de befintliga betongkonstruktionerna inte är så gamla att problemet blivit riktigt akut. Sveriges allra första konstruktion i armerad betong byggdes av Kreuger & Toll 1908 och ligger mellan Sveavägen och Malmkillnadsgatan på Kungsgatan i Stockholm och är alltså nu 100 år gammal. Efterhand som betongkonstruktionerna åldras kommer prioriteringen av underhållsinsatserna att bli avgörande för att få ekonomi i verksamheten. Det byggs ständigt nytt och det tillförs därför hela tiden objekt som så småningom måste prioriteras vad gäller underhåll. Man kan argumentera att vi från och med nu borde bygga allt i högsta hållfasthetsklass för att kommande generationer inte plötsligt skall få på sig ett ohanterbart underhållsproblem. Underhållskostnaderna kommer med säkerhet att öka. Det går att visuellt se på en konstruktion om den kräver omedelbart underhåll, men det går inte att se om det kan anstå ytterligare 20 år innan konstruktionen repareras.

8.15 Övervakning måste vara yteffektiv, man kan inte täcka en konstruktion med sensorer!

Problematiken vid kärnkraftverken har en helt annan dimension än vanliga konstruktioner. Det är frågan om att man måste kunna visa att man på ett trovärdigt och ansvarsfullt sätt underrättat sig om tillståndet i anläggningen. Nackdelen med riskanalys är att man bara kan bedöma de skadefall man kan föreställa sig. Stora olyckor inträffar nästan per definition där man inte väntat dem och framförallt inte när man väntat dem. Då hade de nämligen inte blivit stora olyckor. Det är fråga om ansvaret för att även klara av det oväntade det rör sig om. Akustisk emission kräver att sensorerna sitter nära emissionspunkterna, då de höga frekvenserna snabbt dämpas ut när de breder ut sig i betongen. För ett seismiskt nät kan mätpunkterna placeras ut glesare och det är ett viktigt utvecklingssteg att ta reda på hur glest de kan sitta.

8.16 Vilken är nyttan med kontinuerlig övervakning?

En omfattande olycka kan förmodas föregås av händelser som kan varseblivas genom kontinuerlig övervakning. Utan sådan övervakning inträffar alltid en

olycka utan föregående varning. I annat fall har underhållet missköts på ett alarmerande sätt. Kontinuerlig övervakning är därför en säkerhetsfråga. Om man genom kontinuerlig övervakning kan konstatera tydliga tendenser i materialet kan det användas för underhållsplanering. Kontinuerlig övervakning är därför ett ekonomiskt styrmedel. Genom kontinuerlig övervakning kan man varsebli processer man tidigare inte trott förekom. Kontinuerlig övervakning är därför också en väg till ökad kunskap.

8.17 Man upprätthåller hög säkerhet i betongdammar utan kontinuerlig övervakning!

En betongdamm är i högre utsträckning än en reaktorinneslutning en aktiv komponent. Skevheter medför att luckor inte kan manövreras, läckage konstateras genom okulär besiktning. En reaktorinneslutning är förhoppningsvis under hela sin livstid en passiv komponent. Under normala driftförhållanden skall den bara bära sig själv. Först i ett fullt utvecklat reaktorhaveri, då flera föregående säkerhetssteg slagits ut, aktiveras inneslutningen. Då först får man ett liknande besked som betongdammar lämnar dagligen.

9 Slutsatser

Nästan alla delar i ett kärnkraftverk kan successivt bytas ut men det gäller inte reaktorinneslutningen av betong. Den måste i stället kontrolleras och övervakas för att man skall säkerställa en fortsatt säker driftsituation.

Genom rätt val av metod för ett specifikt problemområde erbjuder OFP-metoderna en framkomlig väg för tillståndskontroll av betongkonstruktioner i reaktorinneslutningar. Denna rapport visar att det inte finns någon generellt bästa metod, utan att metodvalet måste styras av det problem man vill belysa. Tillståndskontroll kan emellertid endast ge besked om läget vid en vald tidpunkt, händelser kan inte registreras.

För att händelser skall kunna registreras krävs kontinuerlig övervakning och upprättande av kontinuerliga tidsserier mätdata. När sådana data samlats in under några år kan man dra statistiskt säkerställda slutsatser om huruvida ett drifttillstånd ligger inom den normala variationsbredden eller om denna överskrids, samt hur mycket. Därigenom skapas förutsättningar för automatiserade alarm, vilka skall utlösa en definierad sekvens av handlingar. Tidsserier är dessutom ett värdefullt arv vi kan lämna vidare till nästa generation.

OFP-metoderna saknar förmåga att bestämma brotthållfastheten i betong i en konstruktion, men det kan inte heller odiskutabelt ske med någon annan metod. Däremot kan OFP ge besked om spridningen i hållfasthet i betongen och därigenom medge att man anpassar säkerhetsfaktorerna efter denna. Alternativt kan man behålla säkerhetsfaktorerna som de är idag och utnyttja den ökade kunskapen om spridningen till att medge en förlängd drifttid.

Om man har kontinuerlig övervakning av en konstruktion innebär det att man kan tillåta en lägre säkerhetsnivå. Alternativt kan man behålla säkerhetsnivån och se tillskottet i säkerhet som ett motiv att tillåta förlängd drifttid. Eftersom kontinuerlig övervakning sker på en och samma betong är det också möjligt att följa hållfasthetens utveckling med tiden via ljudhastighetens variation.

Möjligheten att genom tillståndskontroll och övervakning reducera säkerhetsfaktorer och sänka säkerhetsnivån är synonymt med att tillåta förlängd drifttid för reaktorinneslutningen om man bibehåller nuvarande säkerhetsfaktorer och säkerhetsnivå.

10 Tillkännagivanden

Författaren vill tacka Tekn Dr Nils Rydén för ingående faktagranskning av rapporten och också Tekn Dr Christian Bernstone, Tekn Dr Manouchehr Hassanzadeh, Professor Sven Thelandersson och Professor Lars-Olof Nilsson för värdefulla synpunkter och frågor som arbetats in i materialet och som tas upp till diskussion i kapitel 8. Ansvar för vad som står i rapporten och eventuella fel är emellertid helt och hållet författarens.

11 Referenser

[A]. Rydén, N., Jeppsson, J. and Park, C., "Destructive and Non-Destructive Assessment of Concrete Structures", Nordic Concrete Research Conference, Helsingör, 2002, pp 153-156

Rapportunderlaget i Bilaga 1

12 Bibliografi

Malhotra, V.,M. and Carino, N.,J., "Nondestructive Testing of Concrete" 2nd Edn, CRC Press, ASTM International, ISBN 0-8031-2099-0, 2004

Bungey, J., "Testing Concrete in Structures", 4 rd Edn, Chapman & Hall, 2006

Al-Qadi, I., editor "NDE Conference on Civil Engineering", 6th International Symposium on NDT in Civil Engineering, St Louis, Missouri, August 14-18, 2006

13 BILAGOR

Bilaga 1 Sammanfattning av rapportunderlaget (46 s)

Bilaga 2 Metodanvändningstabell (1 s)

Bilaga 3 Deltagare Gruppen för Oförstörande Provning av Betong (1 s)

Bilaga 4 Medlemmar i Föreningen för Oförstörande Provning (1 s)

ELFORSK
KÄRNKRAFTTEKNISKT BETONGPROGRAM 2007-2009

**UTVÄRDERING AV OFÖRSTÖRANDE PROVNINGSMETODER
MED MÖJLIGA TILLÄMPNINGAR INOM
KÄRNKRAFTTEKNISKA BETONGKONSTRUKTIONER**

Bilaga 1: Sammanfattning av de rapporter som utgör underlaget

Peter Ulriksen
Lunds Tekniska Högskola

December 2007

Sammanfattade arbeten

- 1. Utvärdering av befintliga metoder för oförstörande provning av betong i kraftanläggningar. Elforsk rapport 99:45 . Christian Bernstone, 79 sidor. 5**
- 2. NI-Project NDE of Concrete Results of capability trials of the Ultra-Sonic Pulse Echo unit A 1220. Peter Shaw, Force Institute, August 2000, 15 sidor. 7**
- 3. Uppgradering av Forshuvuddammen. En demonstrationsstudie av oförstörande undersökningsmetoder och cementinjektering. Bernstone och Thorsell 2001, 97 sidor. 9**
- 4. Nya erfarenheter från oförstörande provning av betong i dammar. Christian Bernstone 2001, 5 sidor. 11**
- 5. Bärighetsutvärdering av skadade betongdammar. En analys av CONTECVET-manualens användbarhet på svenska betongdammar. Thomas Eksktröm, 105 sidor. 13**
- 6. Ny guide om oförstörande provning av betong. Christian Bernstone 2001, 9 sidor. 15**
- 7. A Practical Guide to Non-Destructive Testing of Concrete Structures (Manuscript not finished, P.Shaw och J Rasmussen 2003, 96 sidor. 17**
- 8. Non-destructive Testing of Concrete Structures - An Owners Guide. Bernstone et al 2004, 47 sidor. 19**
- 9. En praktisk guide till oförstörande provning av betongkonstruktioner. Utan författare, men troligen Force Technology, 9 sidor. 21**
- 10. Recent Progress within Non-destructive testing of concrete structures. Christopher Mattei, Bodycote (Fd SAAB, Bofors mfl företag), 2006, 26 sidor. 23**
- 11. CONMOD Force Technology, EU-projekt, 2005, 45 sidor. 25**
- 12. CONMOD - Main report Force Technology 2005, 140 sidor. 27**
- 13. Preliminary inspection of the containment structures to OL1 and OL2, FORCE TECHNOLOGY, Jesper Staerke Clausen/Peter Shaw/Nils Rydén, 2005, 13 sidor + bilagor. 29**
- 14. Examinations of the containment structures of OL1 and OL2 (2006), FORCE TECHNOLOGY, Jesper Staerke Clausen/Allan Kristensen, 2007, 20 sidor +bilagor. 31**
- 15. Nyare metoder för tillståndskontroll av fyllningsdammar, VASO / ELFORSK, Sam Johansson, Maria Bartsch, Ola Landin, J&W Anläggning, Gerhard Barmen, Torleif Dahlin, Peter Ulriksen, Teknisk Geologi LTH, 1995, 71 sidor + bilagor. 33**
- 16. Blandarhändelsen, Ludvig Thord, SKI Rapport 2005:49, 66 sidor. 35**

17. Högupplösnings tredimensionell impulsradar, LTH Teknisk Geologi, Peter Ulriksen, 1995, 35 sidor + bilagor. 39

18. Geofysiska metoder för Oförstörande Provning och kartering. Peter Ulriksen LTH och Ulrika Wiberg Vattenfall Utveckling AB, 1998, 84 sidor. 41

19. Automated performance monitoring of concrete dams, Christian Bernstone Doktor-savhandling LTH 2006, 94 + 5 artiklar. 43

20. Civil Structural Health Monitoring - Strategies, methods and Applications, Doktors-avhandling, Arvid Hejll, LuTU 2007, 97 sidor + 5 artiklar. 45

Dessa 20 arbeten presenteras sammanfattade på typiskt en sida vardera med exempel från innehållet på omstående sida.

1. Utvärdering av befintliga metoder för oförstörande provning av betong i kraftanläggningar. Elforsk rapport 99:45. Christian Bernstone, 79 sidor.

Sammanfattning

Rapporten är en utvärdering av olika oförstörande provningsmetoder (OFP) användbara för att undersöka betong i kraftanläggningar. Inga mätresultat diskuteras eller presenteras utan utvärderingen bygger på en enkät utförd i anslutning till en workshop som anordnades i Lund. Det finns också en informativ beskrivning av hur de olika metoderna fungerar med de genomgående rubrikerna metod, mätförfarande, utvärderingsmemtodik samt potential och begränsningar. En sammanställning av olika skadetyper i vattenkraftanläggningar finns i rapporten.

Några olika användningsområdena för OFP beskrivs. De är:

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

De skadefall som ligger till grund för bedömning av de olika metoderna är

- a. Mätning av sprickor - 2 problemställningar
- b. Mätning av spjälkning och delaminering - 2 problemställningar
- c. Mätning av hålrum och inneslutningar - 3 problemställningar
- d. Uppföljning av utförda reparationer - 2 problemställningar
- e. Mätning av betongtjocklek - 2 problemställningar

De aspekter som tas med i bedömningen är

- a. Metodens lämplighet för problemställningen
- b. Geometrisk upplösning
- c. Betongens yta
- d. Inverkan av armering
- e. Lämplighet för olika grova konstruktionsdelar

De metoder som värderas är

- Ultraljudhastighet vid transmission
- Reflekterat ultraljud
- Stående vågmätning (Impact echo)
- Ytvågsseismik
- Akustisk emission
- Termografering
- Radar
- Radarskanner
- Resistivitet
- Högenergिरöntgen

I slutsatserna rekommenderar författaren att metoderna kombineras, då det ofta kan eliminera tveksamheter i tolkningen av mätdata. Högst betyg för olika tillämpningsområden har tilldelats enligt följande:

- Spjälkning och delaminering:* impact echo ytvågsseismik
- Hålrum och inneslutningar:* ultraljudpulseko, högenergिरöntgen, radarskanner
- Betongtjocklek:* impact echo, ytvågsseismik

Exempel

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

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

2 NI-Project NDE of Concrete Results of capability trials of the Ultra-Sonic Pulse Echo unit A 1220. Peter Shaw, Force Institute, August 2000, 15 sidor.

Sammanfattning

Rapporten visar resultat erhållna med den ursprungligen ryska skjuvvågsutrustningen A1220, vilken säljs av JME Ltd i Storbritannien (www.jme.co.uk). Den testade apparaten uppges kunna ställas in för frekvenser mellan 33 kHz och 250 kHz. Numera uppges frekvensen vara fast 55 kHz. Maximala penetrationen man mätt upp är c:a 1 m i homogen betong av god kvalitet. Priset uppges vara c:a £11.000.

Apparaten är unik i så måtto att det är det första instrumentet som utnyttjar skjuvvågor för reflektion. Dessa överförs till betongytan via ett antal piggförsedda sändarelement och detekteras med likadana element, sammanlagt 4 x 6 element med lika fördelning mellan sändare och mottagare. En fördel med skjuvvågor är att de för en given frekvens är kortare än motsvarande tryckvågor, eftersom de senare utbreder sig fortare än de förra. Eftersom dämpningen är frekvensberoende innebär detta att man för given frekvens får bättre penetration med skjuvvågor. Mottagarens stora yta jämfört med annan ultraljudutrustning innebär också att spridningen orsakad av ballastkorn minskar. Eftersom många olika utbredningsvägar registreras av de 12 mottagarna kommer den summerade signalen att rekonstruera den ursprungliga vågfronten. En reciprok process inträffar naturligtvis vid sändningen, så att det bildas en i huvudsak plan vågfront ett stycke framför sändaren.

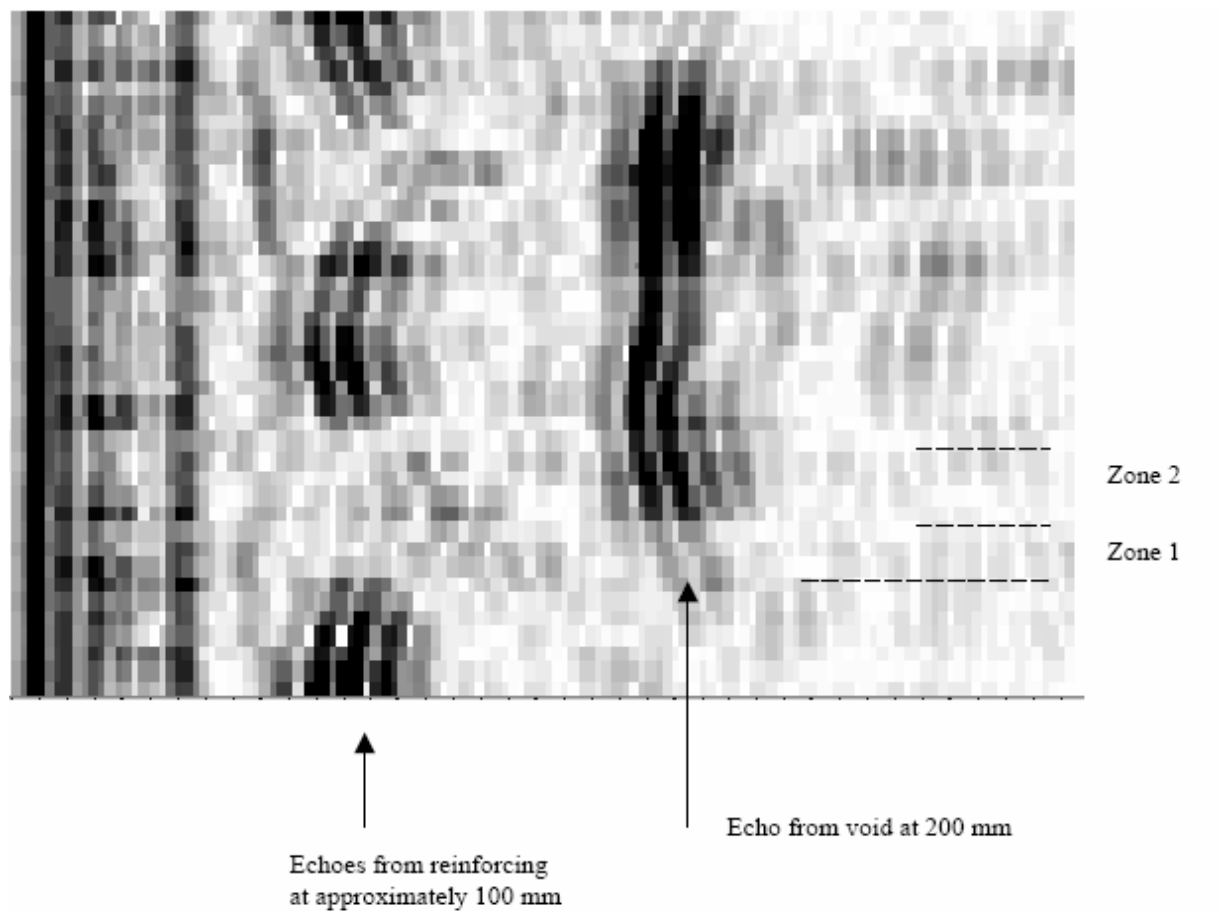


A 1220 Impact echo med skjuvvågor, sändare/mottagare t.h.

Ballaststorleken i betongen påverkar resultatet så att grövre ballast ger sämre resultat. Hålrum med 1 dm sida kan detekteras på 3 dm djup och hålrum med 2 dm sida på 5 dm djup. Även armeringsjärn kan lokaliseras

Registrering kan ske antingen med sk A-scan, vilket innebär att mätningen sker i en punkt och presenteras som en vanlig oscilloskopsignal där tidaxeln motsvarar djupet, eller som B-scan då mätningar från flera tätt på en linje liggande punkter presenteras som ett diagram med flera A-scan signaler bredvid varandra. I det senare fallet är signalernas amplitud omkodad i gråskala och påminner direkt om ekolod eller radardiagram.

Exempel



B-scan diagram med 10 mm separation mellan varje registrering.

Diagrammet ovan visar betongens yta längst t.v. och därefter kommer karaktäristiska hyperbelformade reflexer från armeringsjärn. De böjda reflexerna är ett diffraktionsfenomen och det kan också iaktas i kanten av reflexen från hålrummet. Fenomenet orsakas av att reflektionen sker innan sändare och mottagare befinner sig rakt ovanför reflektorn. Då är avståndet något längre än när sändare/mottagare befinner sig direkt över reflektorn.

3 Uppgradering av Forshuvuddammen. En demonstrationsstudie av oförstörande undersökningsmetoder och cementinjektering. Bernstone och Thorsell 2001, 97 sidor.

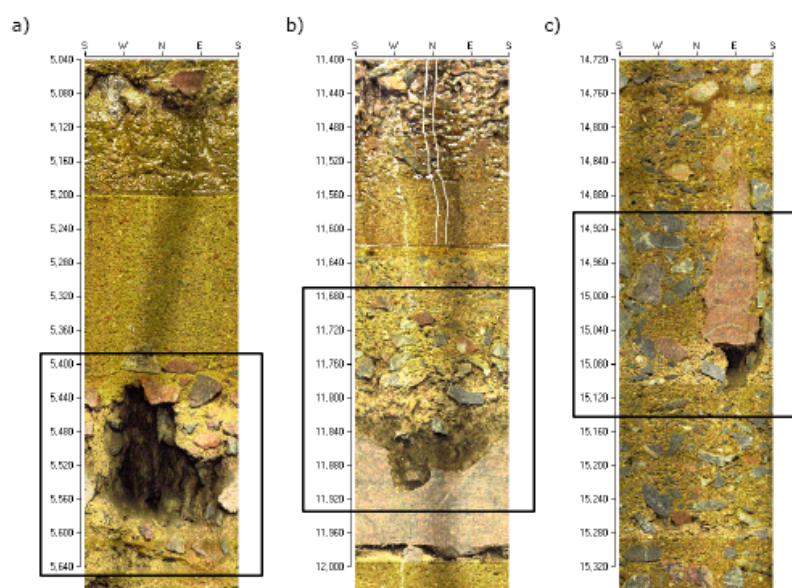
Sammanfattning

Rapporten skildrar metoder som använts för att projektera och följa upp injekteringsarbete i en dammkonstruktion eller om man uttrycker det annorlunda tillståndskontroll och åtgärds-kontroll. Konstruktionen är utförd under den sk blötbetongepoken (Harald Eriksson). Denna betongtyp är känd för att medföra separationsproblem. Dammkonstruktionen har haft inre dränering i botten och vertikalt i pelarnos. Vid arbetet har man använt borrhålsvideo, calipermätningar och radar i denna ordning.

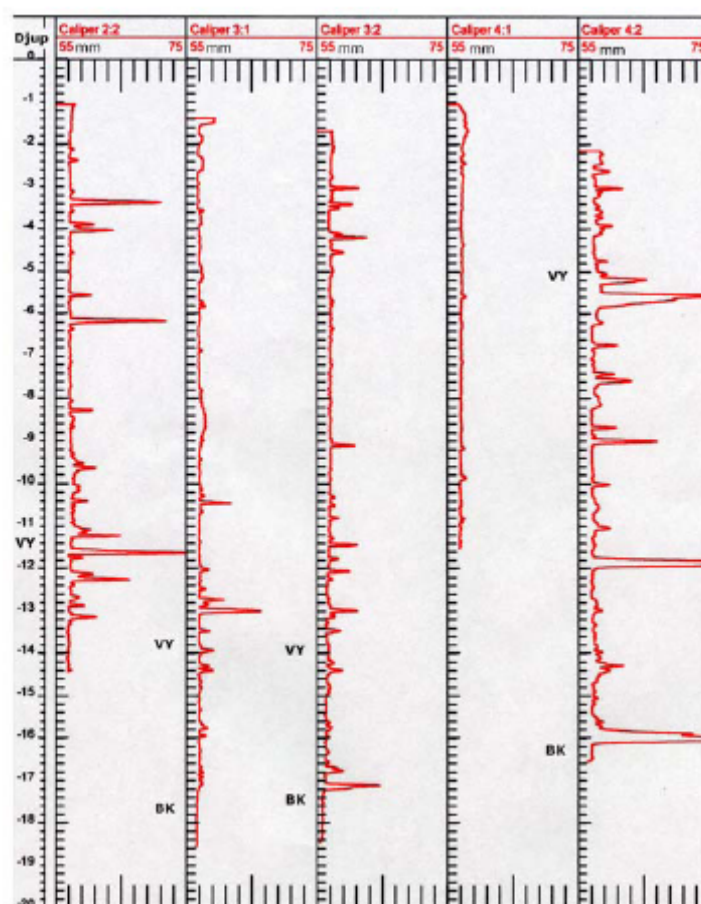
Calipermätning är en metod som används vid borrhålsloggning. En sond med vanligtvis tre armar utfällbara i radiell riktning sänks ner till botten av hålet, varefter en elektrisk motor spänner upp armarna mot borrhålsväggen. Då armarna är fjäderbelastade kommer de att följa borrhålsväggen när sonden dras upp genom hålet. Armarnas vinkel mäts upp och omvandlas till en signal, vilken visar hålets diameter. I de aktuella mätningarna har man emellertid använt en caliper med endast en arm. Calipern används för att man skall få ett mått på hur djupa de hålrum är, som man kunnat identifiera i videobilderna av borrhålsväggen. Om calipersondens armar är långa och starkt inpressade mot sonden kommer den att ha begränsad förmåga att återge djupet av hålrum som har liten utsträckning i hålets riktning. Ett alternativ skulle kunna vara att använda en akustisk televiwer, i princip en liten sonar. En sådan skulle ersätta såväl videofilmning som calipermätning. En fördel med loggningsmetoderna är att de knyter mätdata till borrhålets djup på ett permanent sätt. Detta är inte fallet med upptagna borkärnor, vilka lätt kan komma i oordning. Det är alltså inte säkert att den högre kostnaden för kärborrprover kan motiveras om man inte avser utföra provtryckning.

Med radar har två typer av mätningar utförts med antenner i borrhål, dels reflektionsmätningar och dels transmissionsmätningar. Ekon i reflektionsmätningar kan inte riktningsbestämmas. De senare mätningarna utföres med korsvisa mätpunkter, vilket innebär att alla möjliga sändpunkter i ett borrhål kombineras med alla möjliga mottagarpunkter i ett andra borrhål på ett visst avstånd från det första borrhålet. Det mellanliggande tvärsnittet delas in i tvådimensionella celler vilka tilldeles okända variabler för hastighet och dämpning. Med ledning av uppmätt hastighet och dämpning mellan ändpunkterna kan man lösa ett ekvationssystem som ger värdet på de tilldelade värdena på cellerna. Med dessa värden återges en tomografisk bild av tvärsnittet, dels avseende dämpning, dels avseende hastighet. Båda dessa parametrar ger viktig information om betongkvaliteten. Dämpning är huvudsakligen kopplad till elektrisk konduktivitet, vilken i sin tur kan kopplas till graden av nedbrytning i betongen. Hastigheten är mer kopplad till vattenhalten, vilken i sin tur kan kopplas till vattenfyllda hålrummandelen. För de aktuella mätningarna har antenner med en frekvens av 250 MHz använts. Detta kan uppfattas som en väl låg frekvens för lokalisering av punktreflexer från knytnävsstora hålrum, men är troligen ett klokt val för tomografimätningarna i vilka punktreflexer inte förekommer utan dämpning kan bli ett större problem. Reflektionsmätningarna uppges emellertid ha varit framgångsrika medan de tomografiska mätningarna inte gett förväntat resultat. Det senare orsakas av stark dämpning av de utsända signalerna, vilka inte kunnat detekteras i mottagarhålet. Dämpningen kan orsakas av absorption (hög elektrisk ledningsförmåga) eller spridning (rikligt med avvikelser, t ex hålrum, i betongen). Medan videofilmningen, calipermätningen och reflektionsmätningar med radar ger omedelbart resultat i fält måste tomografiska radarmätningar genomgå omfattande beräkningar innan de presenteras. Själva mätproceduren är mycket tidskrävande. Videofilmning var en bra metod att genomföra åtgärdskontroll.

Exempel



Videobilder av hålrum i betong, vilka visar borrhålets cirkulära vägg utträtad till ett plan.



Resultat från caliperloggning. Markeringen VY motsvaras av stående vattenyta i borrhålet och markeringen BK motsvaras av övergång mellan betong och berg.

4. Nya erfarenheter från oförstörande provning av betong i dammar. Christian Bernstone 2001, 5 sidor.

Sammanfattning

Artikeln presenterades på Kraftindustrins Betongdag 2001 och är en fortsättning på arbetet 3. Den beskriver ett projekt finansierat av Nordisk Industrifond (NIF) "non-destructive testing for integrity determination of concrete structures" vars målsättning är att uppnå kostnadseffektiv metodik för undersökningar genom utarbetande av riktlinjer, vilket i sin tur behöver stöd från resultat av mätningar på betongkonstruktioner. Målsättningen är att utarbeta en handbok.

I början av projektet genomfördes en enkät bland ägarföretagen om vilka problem som skall ha högsta prioritet:

- Detektion av hålrum och inhomogeniteter (inre skada) beroende av materialfel, dåligt tillverkningsförfarande eller tidsberoende nedbrytning.
- Detektion och storleksbestämning av sprickor vinkelrätt mot en betongyta. Vidare detektion av spjälkning och delaminering orsakad av frostsador eller armeringskorrosion.

Nästa prioriteringsnivå blev

- Bestämning av betongtjocklekar med en noggrannhet av 5% på konstruktioner med endast en sida tillgänglig för undersökning.
- Ta fram kapacitet för metoderna att detektera och storleksbedöma armeringsjärn och spännstål.
- Ta fram kapacitet för metoderna att identifiera korrosion genom att bestämma tvärsnittsreduktion för spännstål.

De metoder som ingår i projektet är radar, ultraljudspulseko, ytvågsseismik och röntgen. Ett antal broar och dammar har undersökts. Röntgen har inte varit aktuellt på dammkonstruktioner. Inga exempel på mätresultat ges i artikeln.

Tillsåndsbedömning innebär att värdera skadors inverkan på en konstruktions bärighet med hjälp av information från

- Arkivstudier
- Inspektioner
- Mätningar i fält
- Mätningar i laboratoriet
- Beräkningar
- Ingenjörsmässiga bedömningar

Artikeln understryker att den information som fås med radar, ultraljud eller radiografering är kvalitativ snarare än kvantitativ, vilket gör att metoderna inte är tillräckligt kvalificerade för att få användas på säkerhetskritiska konstruktioner. Internationellt accepterade normer saknas. I artikeln ges också en filosofiskt viktig deklaration avseende provningsverksamheten: "Skadors allvarighet måste kopplas till kritiska snitt i konstruktionselementen. Konstruktören kan identifiera dessa delar av den skadade konstruktionen och vet vilka indata som krävs för att kunna göra arbetet i slutsteget av processen. Han är således den som kan tala om vilka provningar, undersökningar och vilken bakgrundsinformation som behövs för att värdera en skada beräkningsmässigt."

För all provning gäller således det självklara att valda metoder skall tillföra information som det finns behov av.

Exempel

Tom sida

5. Bärighetsutvärdering av skadade betongdammar. En analys av CONTECVET-manualens användbarhet på svenska betongdammar. Thomas Eksktröm 2001, 105 sidor.

Sammanfattning

Föreliggande projekt avser att gå igenom och analysera olika möjliga metodiker för oförstörande provning med tillämpningar på betongtekniska konstruktioner i kärnkraftverk. Därför kommer en stor del av denna rapports innehåll att hamna utanför uppdraget.

Syftet med det i rapporten beskrivna projektet är att utreda hur CONTECVET-manualen kan användas som verktyg för förvaltning av betongkonstruktioner. Den är unik så tillvida att den försöker koppla ihop konstruktörens arbetsmetodik med materiallära om nedbrytningsmekanismerna frost, korrosion och alkali-kisel-reaktioner (AKR). Manualen bygger på principen om stegvis förfinade (och dyrare) undersökningar.

Målet med projektet är att tillämpa den färdiga manualen på betongkonstruktioner med speciella skador. Denna rapport är avgränsad att behandla nedbrytning förorsakad av frost och AKR.

Värdet av rapporten ligger främst i att den sätter in de oförstörande provningsmetoderna i det större sammanhang där de måste accepteras om de skall komma till användning. I rapporten görs den viktiga distinktionen att en studie kan indelas i en kvalitativ och en kvantitativ nivå.

Datainsamling och kontrollberäkningar bör ske växelvis för att ge underlag för vad som skall undersökas, exaktare värden på mekaniska egenskaper eller laster och när man skall gå djupare i undersökningarna.

För t ex frostskador anges ett tillvägagångssätt enligt följande steg:

Steg 1: Platsbesök med notering av skador och klimat- och miljöbetingelser. Om skador finns:

Steg 2: Insamling av data, byggår, beräkningar, relationsritningar, materialprovningar, underhåll, reparationer, tidigare undersökningar. Utgående från steg 1 och 2 utför man:

Steg 3: Preliminär undersökning indelad i en kvalitativ och en kvantitativ nivå. På den kvalitativa nivån beskriver man skadornas omfattning och de delas in i olika klasser. Den kvantitativa nivån innebär att beräkningar utförs med "lower bound values" för hållfasthet eller med uppmätta värden, om sådana finns tillgängliga. Steg 3 ger underlag för steg 4.

Steg 4. Beslut för vidare åtgärd tas: ingen vidare undersökning behövs, en detaljerad undersökning måste göras eller konstruktionen måste omedelbart repareras, förstärkas eller rivas.

En detaljerad undersökning indelas i:

Steg 5: A: Bedömning av den aktuella statiska säkerheten

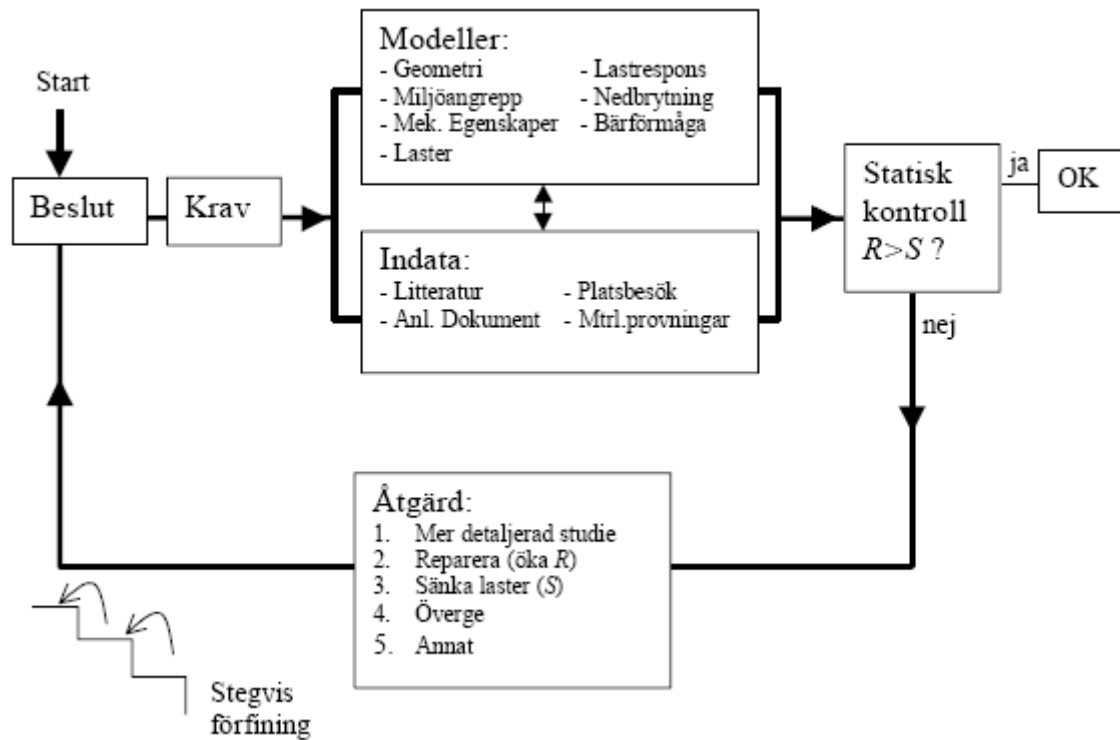
B: Bedömning av den framtida statiska säkerheten

Steg 6: Uppskattning av synergi med andra nedbrytningsmekanismer (ibland också aktuellt att kontrollera vid preliminära undersökningar).

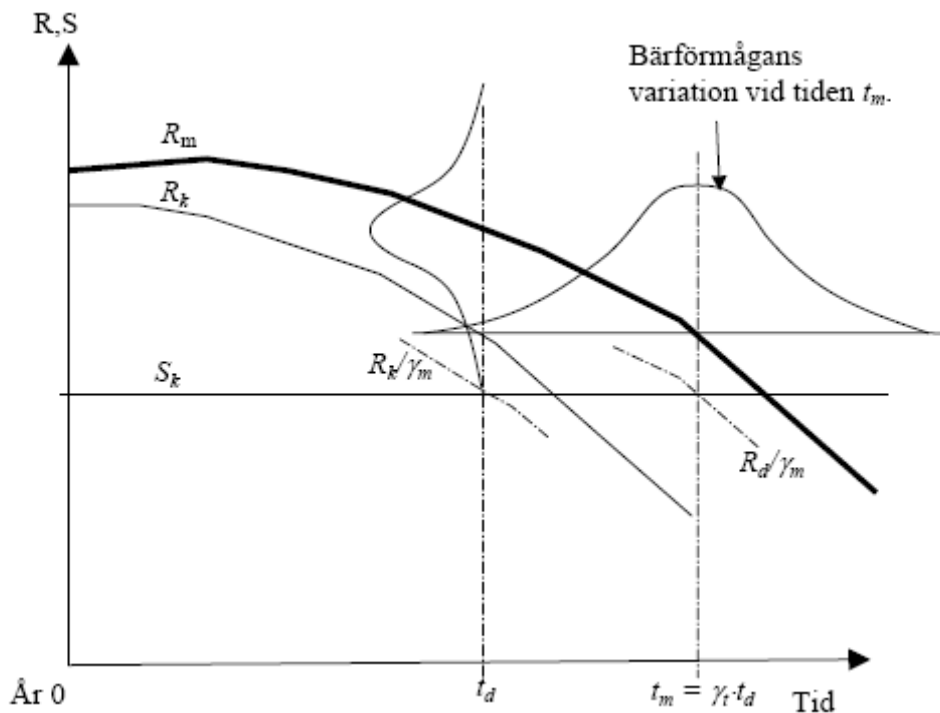
Under rubriken "Datainsamling / Materialprovningar" tar författaren upp tryck- och draghållfasthet samt elasticitetsmodul. E-modulen kan beräknas med hjälp av ljudutbredningsmätningar. Provtagningsriktningen vid uttagning av kärnborrprov bör nog övervägas och sammanfalla med maximala belastningsriktningen.

Rapporten mynnar ut i en rekommendation att en relativt tunn anvisning för tillståndskontroll av befintliga, beständighetsskadade hydrauliska betongkonstruktioner bör upprättas som komplement till RIDAS och som anknyter till CONTECVET-manualen.

Exempel



Möjlig schematisk procedur för att med stegvis förfining av undersökningarna uppskatta den strukturella säkerheten hos en hydraulisk konstruktion utsatt för bland annat laster och miljömässig nedbrytning.



Innebörden av en partialkoefficient för livslängden och som beror på statistisk variation och typ av nedbrytning, Sarja & Vesikari (1996)

6. Ny guide om oförstörande provning av betong. Christian Bernstone 2001, 9 sidor.

Sammanfattning

Detta är en Power-point presentation som presenterar materialet i (4). "Nya erfarenheter från oförstörande provning av betong i dammar."

I projektet använda metoder

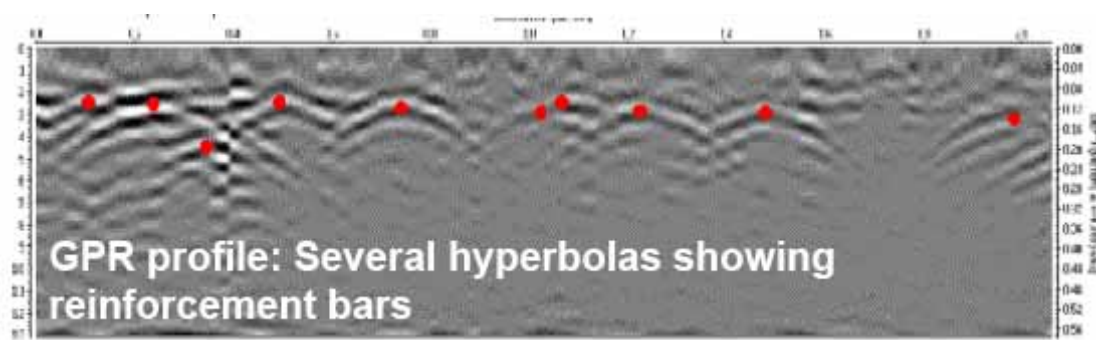
- Röntgen
- Ultraljudpulseko,
- UPE
- Ytvågsseismik,
- SASW
- Radar

- Målsättningen är att uppnå kostnadseffektiv metodik för undersökningar
- Riktlinjer kommer att utarbetas och sammanfattas i en handbok (owners guide)
- Tydlig beskrivning av för-och nackdelar med att använda sig av oförstörande provningsmetoder i ett antal olika situationer
- Det skall gå att bilda sig en realistisk uppfattning om vilka förväntningar man kan ställa på resultatet av ofp-undersökningar av betong

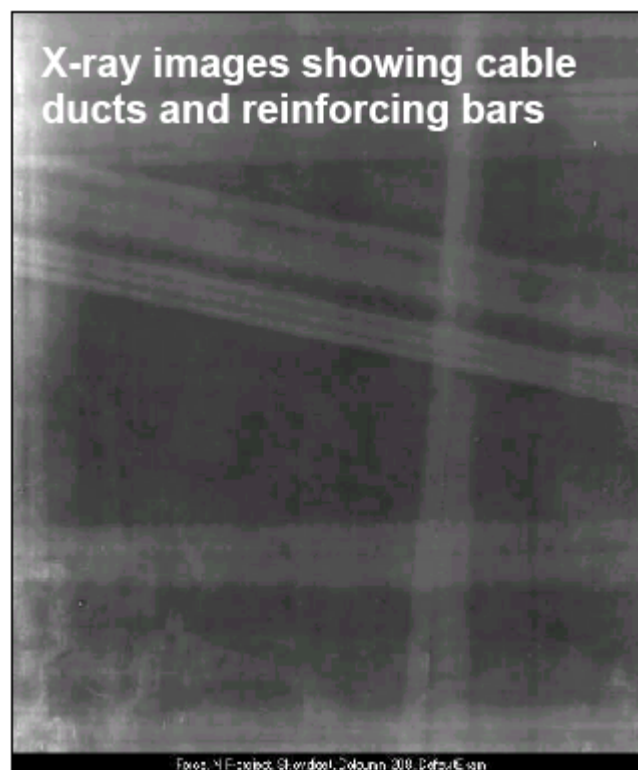
Diskussion

- För all provning gäller det självklara att valda metoder skall tillföra information som det finns behov av
- För att OFP skall bli ett allmänt accepterat verktyg krävs det att konstruktörer, material- och provningsingenjörer talar samma språk
- I annat fall genomförs OFP utifrån felaktiga förväntningar, med resultat som inte tillför en tillståndsbedömning användbar information
- Omvänt, om inte metodernas kapacitet kan nå bredare publik så kommer situationer uppstå där man drar på sig stora kostnader p.g.a. ovälkomna överraskningar som hade kunnat tas hänsyn till med OFP
- Projektets handboks syftar till att rätta ut frågetecken och tydligt beskriva för-och nackdelar med att använda OFP

Exempel



Hyperboliska reflexer från armeringsjärn i betong registrerade med radar



Avbildning av armeringsjärn och spännkabelrör med röntgen

7. A Practical Guide to Non-Destructive Testing of Concrete Structures. Manuscript not finished P.Shaw och J Rasmussen 2003, 96 sidor.

Sammanfattning

Detta förefaller vara slutrapporten från det projekt som finansierades av Nordiska Industrifonden (NIF), till vilket hänvisas i rapport 4 denna sammanställning och i vilket följande grupper deltog: Force Technology, Malå Geoscience, Luleå Tekniska Universitet, Vattenfall utveckling, Danish Road Directorate, Norwegian Road Directorate, NCC Teknik och Icelandic Building Research Institute.

Rapportens uppbyggnad består av en introduktion varefter följer Problemtyper, OFP-metoder, Tillämpning av OFP metoder på förekommande problem samt Val av metoder och ett Appendix.

Inledningsvis konstateras att verkliga förhållanden för OFP-undersökningar skiljer sig markant från laboriemiljö. Man noterar också att äldre tiders betong är av så dålig kvalitet att den försvårar OFP-undersökningar. OFP metoder kan användas för utförandekontroll (compliance), insamling av specifika data och parametrar, tillståndskontroll och skadebedömning. Utförandekontroll anges vara det enklaste fallet, medan de andra tillämpningarna ofta kräver någon form av provtagning för att det önskade resultatet skall nås.

"Det sägs ofta att OFP-metoder är kvalitativa och av begränsat värde för konstruktören, att resultaten är mångtydiga och inte av tillräckligt hög kvalitet för att han skall ha nytta av dem. Det är kanske bättre att definiera målsättningen och överväga vilka metoder och kombinationer av metoder, som är lämpligast för att göra en objektiv bedömning av metoderna i ett konkret fall, hellre än att fokusera på varför vi inte skall använda dem."

De betongkonstruktioner som är aktuella för undersökningar har oftast en tjocklek av 300 - 1500 mm. Provkroppar har tillverkats i projektet och därutöver har 6 broar, 2 dammar och 1 kärnkraftinneslutning testats. Av de 17 tillämpningar som listats har man funnit att detektering av hålrum och kartläggning av inhomogenitet i betong liksom detektering av horisontella och vertikala sprickor är de viktigaste. Kartläggning av armeringsjärn och spännkabelrör fick betydligt lägre prioritet i intressegruppen.

Det som har testats är radiografiska, elektromagnetiska och akustiska metoder. Flera av dessa var tidigare välbekanta. Nya i testet var den ryska apparaten för undersökning med horisontalpolariserade skjuvvågor Spektrum A1220, en radiografiapparat från AGFA Structurix och en nyutvecklad radarantenn från Malå Geoscience och Luleå Tekniska Universitet.

Radiografiska metoder: Betatron 7.5 PXB och AGFA Structurix

Elektromagnetiska metoder: Radar 500 - 1000 MHz, täcksiktsmätare

Akustiska metoder: A1220, stående vågor, ytvågor och ultraljudhastighetsmätare UK1440

Redogörelse görs för de använda principerna och apparaterna beskrivs. Den mätbara parameter som bäst kopplar till hållfasthet är ljudhastigheten. Variationsbredden hos uppmätta ljudhastigheter är också ett kvantitetsmått som kan användas för att bedöma betongkvalitet. Hålrum i betongen längs transmissionsvägen kan medföra att uppmätta ljudhastigheter blir för låga. p76. Tre hastigheter kan mätas upp: kompressionsvåg, skjuvvåg och Rayleighvåg. Därmed kan tre obekanta lösas ut t ex E-modul, tvärkontraktionstal och densitet (PU och s 81)

Exempel

Application and purpose	Comment	Ranking (%)
Detection of voids & inhomogeneity, typically to locate construction flaws	Quantify void detection threshold in thick sections (size of void and depth)	41.8%
	Detect voids > 20mm in grouted tendon ducts	41.8%
Detection and sizing (depth, width, length) of cracks normal to the surface	Improve variable performance statistics associated with depth measurement of surface cracks.	41.8%
Detection of delamination (cracking parallel with concrete surface)	Improve variable performance statistics for detecting large laminar flaws at > 10mm depth and larger than 100mm in any direction	39%
Measurement of concrete thickness to obtain as-built details	Measure concrete thickness with single-sided access with sensitivity of $\pm 5\%$ section thickness.	37.8%
Mapping/sizing of steel reinforcement and tendons to establish as-built details	Enhanced resolution to measure reinforcement diameter with sensitivity of $\pm 10\%$	20.0%
	Resolve multiple layers of reinforcement, identifying individual bars at spacing <150mm and depths >30mm and measure bar diameter with sensitivity of $\pm 10\%$	20.0%

Table 1. Ranking of end-user requirements. Voids and cracks have high priority while reinforcement mapping is given low priority

Structure	Objective	Motivation	Result	Method
Bridge beam (350mm)	Pre-stressed cable and duct fill condition	Cracking and leaching visible	Void inside cable ducts. Wrong alignment of cable ducts	H.E.C.R. and radar
Bridge slab (1000mm)	Pre-stressed cable and duct fill condition	Extensive cracking through slab with leaching	No voids in ducts	H.E.C.R.
Bridge slab (1000mm)	Depth of s-o cracks	Visible on top surface	Crack depth less than cover thickness	U.P.E.
Bridge columns (900mm)	Depth of s-o cracks	Visible at surface	Crack depth limited (<100mm)	U.P.V. and I.E.
Dam pillar (depth < 200mm)	Reinforcement position in relation to cracks and delamination	Visible cracks due to a.s.r. freezing and movement	Reinforcement mapped	Radar
Dam retaining wall (several m)	Depth of concrete deterioration from surface	Visible cracks due to thermal shrinkage and freezing	Damage depth and concrete quality estimated	S.A.S.W and U.P.V

Table 2. Examples of structures investigated as part of the NIF-project.

8. Non-destructive Testing of Concrete Structures - An Owners Guide. Bernstone et al 2004, 47 sidor.

Sammanfattning

Även denna rapport baseras på det arbete som utfördes med stöd bl a från Nordisk Industriefond. Den har dock ett lite annat perspektiv än rapport 7, som är mer teknisk. Rapporten beskriver de deltagande organisationerna och de anläggningsbestånd som dessa förvaltar. Därefter sker en genomgång av de inspektionsprocesser som förekommer och sedan följer en sammanfattning av de provningsmetoder som använts. Denna bygger i stor utsträckning på rapport 7. Rapporten avslutas med redogörelse för mätningarna på de olika försöksobjekten och slutsatser. Vissa av objekten förekommer också i rapport 5 (Midskog, Hotagen). I denna rapport tar man upp tre kategorier av OFP-tillämpningar:

- Utförandekontroll
- Skadedetektering och-karaktärisering
- Reparationskontroll

Utförandekontroll: Radar (2), skjuvvågsreflektion (3), ultraljudhastighetsmätningar (2).

Radar klarar armeringsjärn till 250 mm djup och att lokalisera spännkabelrör även i närvaro av tät ytarmering, men kan störas av vattenfyllda vertikalsprickor vilka ger samma mönster som armeringsjärn. Skjuvvågsreflektion detekterar spännkabelrör och armering men inte slutna, horisontella sprickor och kan inte användas för kontroll av injektering i spännkabelrör och det kan inte hastighetsmätningar heller.

Skadedetektering och karaktärisering: Ytvågsmätningar (6), skjuvvågsreflektion (8), ultraljudhastighetsmätningar (5), radar (4), galvanostatiska mätningar (1), radiografi (1), impact echo(1)

Ytvågsmätningar fungerar bra för att bedöma betongens allmänna tillstånd. t ex i en stödmur liksom skadeutbredning i bropelare. Ultraljudhastighetsmätning hade problem med ytliga sprickor, särskilt om dessa är längre än 80-100 mm, men fungerade bra för att karaktärisera svaghetszoner i en stödmur och kan användas för att bedöma betongens hållfasthet. Skjuvvågsreflektion har också problem med ytliga sprickor och grov ballast men kunde t ex användas för att konstatera att ytliga sprickor inte nådde ner till armeringsjärnen samt för att lokalisera hålrum bakom en 600 mm tjock betonginklädnad i en tunnel. Radar kunde finna ytliga armeringsjärn i en stödmur. Stående vågmätningar ger information om styvheten hos bropelare och ultraljudhastighetsmätningar kan också ge information om sprickors längd och djup. Den galvanostatiska metoden är användbar för att testa täcksikt och korrosionsnivå hos ingjuten armering. Radiografi kan detektera hålrum i och i anslutning till spännkabelrör.

Reparationskontroll: Skjuvvågs-mätningar (1), ytvågsmätningar (1), impact echo (1)

Endast skjuvvågsreflektion gav användbara resultat vid mätningar på ett antal skibord. Vattenläckage förmodas orsaka att de andra metoderna fungerade dåligt.

Rapporten innehåller en avslutande sammanfattning med tankvärda slutsatser om vad som krävs för att tillståndskontroll skall kunna utföras på ett effektivt sätt, se exempel omstående sida.

Exempel

(Översatt från engelska språket som använts i rapporten.)

"För att oförstörande provning skall bli ett accepterat verktyg krävs det att konstruktörer, material- och provningsspecialister avser samma saker när de kommunicerar. I annat fall finns det en uppenbar risk att undersökningar utförda med OFP-metoder görs med felaktiga förväntningar dvs att resultaten inte bidrar till att lösa problemen. Motsatsen gäller också. Om OFP-metodernas förmåga inte kan spridas hos de berörda grupperna finns det en uppenbar risk att tillståndskontroll blir dyrt på grund av oönskade överraskningar, vilka hade kunnat förutsägas om OFP-metoder hade använts."

9. En praktisk guide till oförstörande provning av betongkonstruktioner. Utan författare, men troligen Force Technology, 9 sidor.

Sammanfattning

Även denna skrift har tillkommit med Nordisk Industrifond-projektet som bakgrund. Det är en mycket kortfattad och informativ sammanställning av de viktigaste resultaten i projektet, särskild avseende den stora provkropp som Force Technology har gjutit. Den är 4 x 4 x 0.8 m och åtkomlig på både över och undersida då den har formen av en rambro. På grund av skriftens kortfattade natur citeras de viktigaste delarna nedan.

Ett antal fall finns där man kan ha användning för OFP:

- *Överensstämmelse med ritning* - t ex armeringsdetaljer, betongtjocklek.
- *Bestämning av specifika data och parametrar* - t ex betongens elasticitetsmodul, armeringsjärns antal och diameter .
- *Tillståndsbedömning* - t ex betongens homogenitet, hållfasthet och dennas variation, vidhäftning mellan olika betongskikt.
- *Skadevärdering* - t ex betongskador orsakade av brand, frost, ballastreaktioner, tjockleken på skadade skikt samt korrosionsdjup i armering.

Ett par, ej tidigare kända, metoder som har kommit fram under projektets gång visade sig vara mycket användbara, nämligen ultraljudinstrumentet A1220 från det ryska företaget Spectrum samt digitalröntgensystemet från Agfa Strukturix. Röntgenstrålning bildas när elektroner, accelererade till höga energinivåer, tvingas mot en platta av tung metall vilket leder till att det utvecklas fotoner eller knippen med strålningsenergi. Gammastrålning orsakas av att vissa atomkärnor (isotoper) sönderfaller på grund av deras instabilitet.

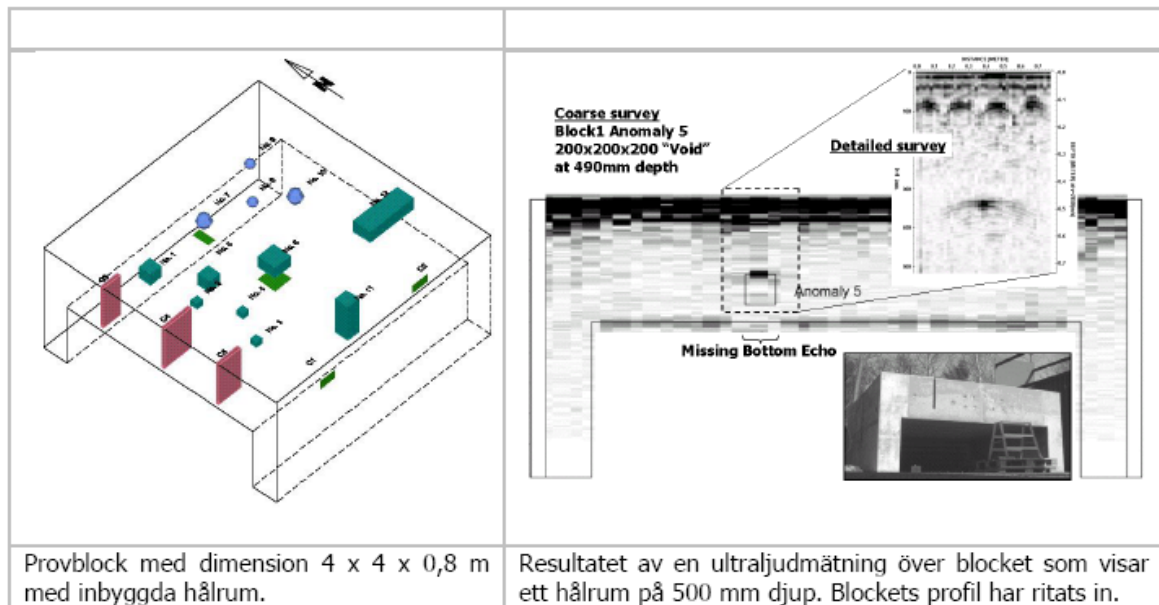
Om betongen är av god kvalitet och maximal ballaststorlek < 25 mm anses Skjuvvågsreflektion vara den bästa tekniken för detektering av hålrum och i vissa fall uppskatta deras storlek. Metoden är också bra för att bestämma tjocklek upp till 600 - 800 mm. Impact echo (stående vågmätning) är däremot inte känslig för ballaststorleken och kan tränga in många meter i betongen beroende på impact-kraften. Den är dock inte lika bra på att detektera hålrum som ultraljudmätning med skjuvvågsreflektion. Den minsta storleken på hålrum eller spricka parallell med ytan som kan detekteras med impact-echo är normalt samma som mätdjupet, t ex 200 mm hålrum på 200 mm djup. Radarvågors inträngning i betong är normalt begränsad till 300 mm på grund av betongens höga konduktivitet ...radar kan vara lämplig för detektering av hålrum i oarmerad och helst ganska torr betong.

Mycket små hålrum (mindre än 20 mm) i betong upp till 1200 mm tjock upptäcktes lätt med högennergiröntgen.

Slut citat.

Skriften är kanske mer en projektsammanfattning än en guide, men som sådan är den mycket informativ.

Exempel



10. Recent Progress within Non-destructive testing of concrete structures. Christopher Mattei, Bodycote AB, 2006, 26 sidor.

Sammanfattning

Orsakat av att effektiviteten i underhållsprogram är starkt beroende av metoder som kan förutsäga återstående livslängd, håller kraven på OFP-metoder att ändras från förmåga till skadedetektering till skadekaraktärisering och inmätning. Denna skrift har till syfte att beskriva utvecklingen inom området de senaste åren och föreslår avslutningsvis ett forskningsprogram.

1998 kom en rapport från Nuclear Energy Agency, vilken presenterar en detaljerad analys av de nödvändiga prioriteringarna för säkerhetsrelaterad OFP för betong i kärnkraftanläggningar:

- Utförandekontroll eller aktuell detaljutformning (current structural details)
- Skadedetektering
- Karaktärisering och kvantifiering av skador

Rapporten nämner också ett antal praktiska tillämpningar av särskild betydelse:

- Korrosionsbestämning av ingjutna eller oåtkomliga (steel liners?)
- Lokalisering av hålrum i injekteringen inuti spännkabelrör
- Förbättrad förmåga att utföra sprickdjupsbestämning
- Förbättrad scanningteknik avseende att kartlägga sprickor inom stora ytor

Som källa för beskrivning har huvudsakligen använts material från de två senaste NDT-CE konferenserna i Berlin (2003) och i St Louis 2006. Redan etablerade tekniker beskrivs enligt skriften väl av "Testing concrete in structures", John Bungey, 2006. Till dessa tekniker hör radar och röntgen, vilka anges ha nått ett mognadsstadium. Radar uppges kunna detektera delaminering, sprickor, hålrum och armeringsjärn. Många nya ultraljudtillämpningar baseras på medicinsk teknik och teknik för testning av metaller.

Stående vågmätningar anges ha fått ny utvecklingskraft i och med att man börjat använda spektrogram som analysmetod. Det påstås ge säkrare identifiering av resonanstoppar än att bara titta på ett globalt spektrum. Spektrogrammet är spektrums tidshistoria. Med scannade stående vågmätningar kan man också göra en datakub och undersöka resonanser i olika frekvensområden inom den avsökte ytan.

Ytvågsmätningar har blivit populärt då metoden kan ge besked om hastighetsfördelningen som funktion av djupet under ytan. Hastigheten kan direkt kopplas till E-modul och kanske indirekt till hållfasthet. Kontaktlösa ytvågsmätningar utvecklas av Nils Rydén i Lund.

Ultraljud har använts länge men till senare utvecklingstrender hör att man försöker bestämma betongens olinjäritet. Förekomst av sådan innebär att det uppstår övertoner. Betongens olinjäritet har framgångsrikt kopplats till betongens nedbrytning och återstående styrka. Torrkopplat ultraljud och överföring via luften har introducerats. Laserinducerade och detekterade ultraljudpulser används. För att få bättre upplösning används arrayer med många element, vilket medför att signalerna kan fokuseras, så att bättre upplösning erhålls. Akustisk emission föreslås för testning av tryckkärl i betong.

Optisk teknik med avsökning av stora ytor och interferometri för deformationsmätning tas upp, liksom en variant på sk Schlieren-mätningar mot ogenomskinliga ytor med hjälp av laser, även det en sorts interferometri.

Fördelen med *scannersystem* lyfts fram, då det kan ge sammanhängande bilder vilka inte är lika svårtolkade som 1-D eller 2-D mätningar. I detta sammanhang nämns också en liten robot (VRAM), vilken med vacuumteknik kan köra runt på väggar och i tak.

Skriften rekommenderar avslutningsvis testning av *akustisk emission* och *interferometriska deformationsmätningar* i trycksatta inneslutningar, utvärdering av *torrkopplade och luftburna ultraljudmätningar tillsammans med scannersystem*, utvärdering av *syntetisk aperturteknik* för sprickmätning liksom fortsatt utveckling av *ytvågstekniken* enligt de linjer som pågår i Lund. Särskilt de kontaktlösa mätningarna tillmäts stora förhoppningar. Som testobjekt pekar författaren på den modell av en reaktorinneslutning som finns på KTH, vilken också kan trycksättas.

11. CONMOD. Force Technology, EU-projekt, 2005, 45 sidor.

Sammanfattning

Rapporten redogör för försök att kombinera FEM-analys med OFP-metodik. Det går till så att man väljer ut kritiska sektioner från en FEM-modellering av ett extremt lastfall och därefter modellerar man den seismiska responsen i dessa delar för olika tillstånd i konstruktionen, t ex åldring. Detta tillvägagångssätt har tillämpats på reaktorinneslutningen till Barsebäck 1 samt i begränsad omfattning på en fransk modell av en reaktorinneslutning MAEVA.

Projektet har visat att det är nödvändigt att ha ett vidsynt angreppssätt och genomlysande tekniker för att undersöka en reaktorinneslutning. Det är också visat att traditionell visuell inspektion och läckttester är otillräckliga.

De frågeställningar man särskilt pekar på är

- överensstämmelse med ursprunglig design
- kvalitet och kondition
- åldring

och de betecknas som konstruktionens "Profil".

Rapporten pekar på vikten av samarbete mellan företrädare för anläggningarna, provningsingenjörer och konstruktörer.

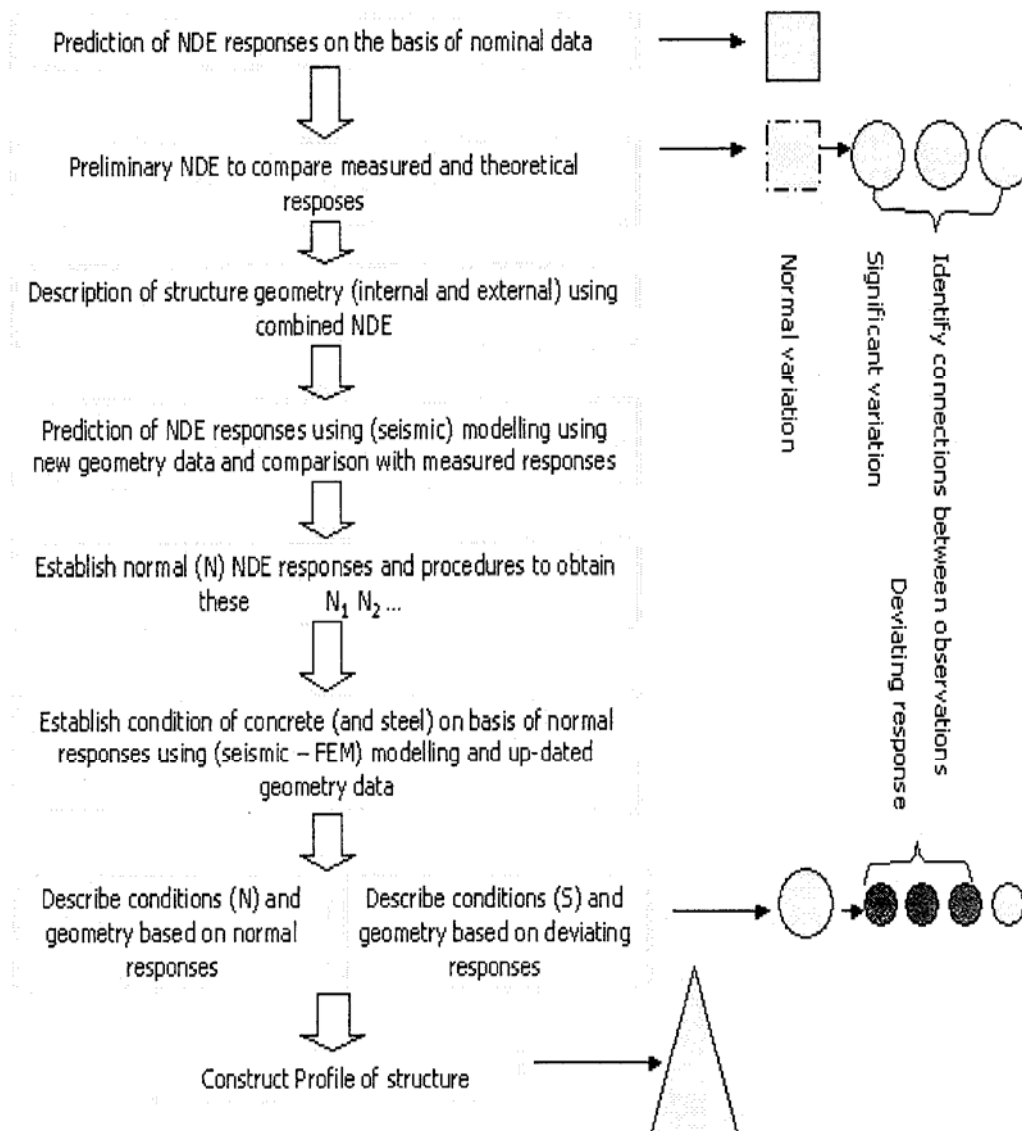
Arbetet i rapporten fokuserar på de seismiska provningsmetoderna, men även radar, relativ fukthaltprob och röntgen användes i undersökningarna i Barsebäck 1. De seismiska fenomen som använts är ytvågor och stående vågor. I den delen av undersökningarna som avser MAEVA förefaller endast FEM-beräkningar och akustisk emission ha studerats. I rapporten pekas på fyra områden inom vilka CONMOD-projektet har fört kunskapen framåt.

1. Samarbete på europeisk nivå.
2. Ökad insikt bland teoretiker om möjligheter med och nödvändigheten av OFP.
3. Ökad insikt bland OFP personal om möjligheter och nödvändighet av FEM-analyser
4. Minskad återhållsamhet och i vissa fall fullt samarbete med kärnkraftföretag avseende flera viktiga frågor.

Rapporten menar att arbetet lett fram till en metod för tillståndskontroll och uppskattning av åldringsfenomen. De viktigaste parametrarna är konstruktionens överensstämmelse med konstruktionsritningarna samt materialens kvalitet. Åldringsprocesserna tycks vara av något mindre vikt. Sprickdetektering har gjorts indirekt med ytvågsmetoden, någon seismisk metod att faktiskt identifiera enskilda sprickor har inte använts. Begreppet åldring är i behov av exaktare definition. I början av konstruktionens livstid betyder åldring hållfasthetstillväxt medan det senare kan innebära sprickuppkomst, urlakning och nedbrytning pga dynamiska laster. I rapporten rekommenderas brett upplagda undersökningar av många olika konstruktioners *profiler* enligt ovan. En handbok omfattande konstruktioners seismiska uppträdande är önskvärd. Testmetoderna måste ha mycket hög repeterbarhet, särskilt om dämpning skall studeras. Inbyggnad av testmål och referensobjekt underlättar framtida mätningar. Avslutningsvis pekar man i rapporten på det stora värde CONMOD-projektet haft för att öka medvetenheten hos kärnkraftoperatörerna om att betong är ett föränderligt material.

Ett 350 x 200 x 30 mm stort hål i betongen vid en rör genomföring i reaktorinneslutningen konstaterades med röntgen.

Exempel



Den procedur som i CONMOD leder fram till en Profil av konstruktionen

12. CONMOD - Main report Force Technology, 2005, 140 sidor.

Sammanfattning

Denna rapport bygger på samma material som rapport 11 CONMOD. Skillnaden är huvudsakligen att det har lagts in ett avsnitt avseende behovsläget (state of the needs). Under denna rubrik anges synpunkterna från Electricité de France (EDF) och från Skandinavien. Eftersom rapporten i övrigt i stort sett omfattar samma material sammanfattas här endast behovsläget.

E D F (Denna del av rapporten är uppenbarligen översatt från franska, varför fel troligen finns i nedanstående text.)

- Säkerhet: Vart tionde år genomförs en säkerhetsöversyn för att uppskatta marginalerna.
- Costs: Underhållskostnaderna ökar kontinuerligt efter 25 år därför att antalet reparationer och reparationstiden ökar.
- Ökad livslängd: Företaget har valet att antingen öka livslängden från 40 till 60 år eller att bygga nytt.
- Framtida kärnkraftverk: Livslängden är nu inräknad i den tekniska kravspecifikationen redan på designstadiet.
- Media: Att reparera en osäkerhetsklassad konstruktionsdetalj står under medias strålkastarljus.

Arbetet med tillståndskontroll är uppdelat i två områden

- Förhindra olyckor, vilket är en uppgift med långtidsperspektiv
- Reparationer, vilket är en åtgärd med korttidsperspektiv

Företaget avser att införa en riskvärdering vid reparationer i syfte att stoppa ökningen av kostnader som läggs ner på onödiga reparationer. Detta angreppssätt baseras på

- Uppskattning av en allvarlighetsindikator som tas fram genom sofistikerade beräkningar.
- Kunskap om skador och indikationer som erhållits med OFP-metoder eller på annat sätt.

Skandinavien

Åldringsprocessen är naturlig, men det har inträffat en del händelser som kan relateras till konstruktionsfel eller bristande utförande av reaktorinneslutningar. Exempel på detta är korrosion i toroiderna i Forsmark 1 (1997) och i Ringhals 2 (2005), korrosion i stålplåtsinklädnaden vid en rörgenomföring i Barsebäck 2 (1993) och ett hål i stålplåtsinklädnaden i Oskarshamn 1 (2003). Vissa av dessa fel krävde att aggregaten var stängda flera månader, vilket förorsakade svåra ekonomiska förluster för ägarna.

Antalet täthetsbrister i reaktorinneslutningar har ökat de senaste åren eftersom aggregaten åldras. Särskilt de svenska och finska aggregaten är svårkontrollerade eftersom tätheten åstadkoms med en ingjuten stålplåt, som inte låter sig observeras. Läcktester utförs 3 gånger per tioårsperiod med tryck uppgående till halva designtrycket, oftare för inneslutningar som har oingjutna spännkablar.

Företagen står inför en period med gigantiska investeringar för att modernisera anläggningarna och för att öka drifttidsuttaget. Av finansiella skäl vill man därför kunna öka livslängden på aggregaten. Många ingående komponenter kan bedömas i detta avseende men man har mycket lite kunskap om hur inneslutningarna skall bedömas, samtidigt som en bristfällig inneslutning troligen medför att aggregatet måste tas ur drift permanent. Därför är denna fråga av primärt intresse i Skandinavien, t ex för SKI i Sverige.

Exempel

Table 2.1

Method	Objective	Result	Comment
Covermeter	Rebar position and depth	Limited use as cover often > 150 mm	Good complement to radar for cover < 80 mm
Radar (800 – 1000 M Hz)	Rebar position and depth	Good	Data quality better for dry concrete
Radar	Cable duct position and depth	Good	Max depth approx 400 mm
HECR (7.5 MeV Betatron)	Rebar and cable duct position, depth and size	Good	Max thickness 1400 mm Preferably combine with radar
HECR	Cable duct (grout fill and cables) condition	Good. Void detection sensitivity checked using mock-ups. Limited information on cable condition and sensitivity not confirmed with mock-up.	Best result with cable duct max 350 mm from image plate (FOD). Improvements and sensitivity analysis required for greater FOD.
HECR	Concrete homogeneity	Good	Small and large voids easily detected. Alien materials (wood and plastic) easily detected in concrete.
UPE (33-100 k Hz)	Concrete homogeneity in outer wall	Limited use due to concrete thickness, aggregate size and some near-surface cracks	Of some use in UCW where concrete cast with fixed form
UPE	Cable duct position	Limited use due to dept of ducts (up to 350 mm) and near-surface defects	As above
IE	Concrete homogeneity in outer wall and concrete quality	Good	Should be combined with other methods to avoid misinterpretation of data
IE	Bond between concrete and liner	Quite good (although sensitivity not confirmed)	Potentially useful method although should be combined with other methods
SASW	Concrete quality over wall section	Good	Useful method but sensitive to local anomalies. Should be combined with other method(s) Seismic response should be modelled for correct interpretation.
SASW	Bond between concrete and liner	Limited	Sensitivity unknown. Optimum procedure not established.
MASW	Concrete quality over wall section including layers and internal geometry	Good. High potential. Effectively a robust multi-mode system	Seismic response should be modelled for comparison. Robust method not sensitive to local anomalies. Provides information on various wave modes in wall including surface and standing waves.

13. Preliminary inspection of the containment structures to OL1 and OL2, FORCE TECHNOLOGY, Jesper Staerke Clausen/Peter Shaw/Nils Rydén, 2005, 13 sidor +bil.

Sammanfattning

Rapporten beskriver arbeten utförda 2005 på reaktorinneslutningarna i reaktorerna OL1 och OL2 i Olkiluoto i Finland. Reaktorerna är byggda i mitten på 70-talet. Ägaren till kraftverket vill ha en preliminär bedömning av betongkvaliteten inför en större inspektion 2006. De parametrar som bedöms är betongens tjocklek, kvalitet samt armeringens och spännkabelrörens läge. För att utföra detta arbete utnyttjas nedanstående metoder med angett syfte:

Ytvågsseismik:	Mätning av våghastighet, tjocklek och styvhet (E-modul)
Radar:	Lokalisering av armeringsstänger och spännkabelrör
Stående vågor:	Tjockleksbestämning och lokalisering av defekter
Täckskiktsmätare:	Lokalisering av armeringsjärn och bestämning av täckskikt
Skjuvvågsreflex:	Lokalisering av spännkabelrör, betongtjockleksbestämning, lokalisering av defekter och bestämning av ytvågshastighet i betongen

Bestämningen av armeringens och spännkabelrörens läge är särskilt viktig, då man senare avser ta ut borrhärlor ur inneslutningens vägg, i delen utanför stålplåtsinneslutningen (gastätt skikt). Tjockleksbestämning med stående vågor skedde genom att utnyttja hastighetsbestämningen från ytvågsförsöken. Ytvågsmätningar och stående vågmätningar sker i samma process, det är endast utvärderingen som skiljer. Alla mätningar har utförts från inneslutningens utsida, i de olika rum som omger denna.

Liksom vid testerna i Barsebäcksverket fann man att glidformsgjutningen hade skapat lutande sprickor i det yttersta betonglagret.

De seismiska mätningarna ger p-våghastighetsmedelvärden över 4000 m/s vilket indikerar god betong. Stående vågmätningarna anger rimliga värden på betongtjockleken, men resultatet är beroende av om man mäter mot stålplåtsinneslutningen eller genom homogen betong. Det senare är fallet i nedre delen av inneslutningen, där stålkaplingen ligger längre in mot inneslutningens centrum. I ytvågsregistreringen finns antydning till refraktion av de först anlända p-vågorna, något som indikerar tilltagande hastighet med djup i betongen.

Resultaten indikerar en betong i god kondition, med hastigheter som ökar med djupet från betongytan. Högre hastighet associeras vanligtvis med bättre betong. Uppmätta värden på Poissons tal (0.30) var högre än de man förväntar sig i betong (0.20). Detta tillskrivs en högre fukthalt i betongen alternativt anisotropa förhållanden. Stående vågmätningarna visade stor känslighet för stålplåtsinneslutningen i det att det tycks uppstå total reflektion i denna gränsyta. Detta tillskrivs möjligheten av dålig akustisk kontakt mellan betong och stålplåt på den yttre ytan, dvs en luftspalt. Betongens ytbeskaffenhet påverkar resultatet med de seismiska metoderna, varför man rekommenderar att färgskikt och ev lös betong i ytan avlägsnas före mätningarna. Detta är också viktigt för att man skall få repeterbara mätningar och det rekommenderas att man fräser bort de översta 5 mm på en yta med diametern 50 mm. Försöket avses upprepas 2006 och då rekommenderas att ett fåtal borrhärlor tas ut för att kontrollera resultatet från de oförstörande provningarna. Fortsatta mätningar rekommenderas upprepas med 3-4 års mellanrum och då endast omfatta de seismiska metoderna. Korrosionstillståndet hos stålplåtsinneslutningen kan mätas från borrhålen man avser ta upp 2006. Radiografi kan användas för att lokalisera hålrum i spännkabelrör vilka kan förorsaka korrosion i spännkablar.

Exempel

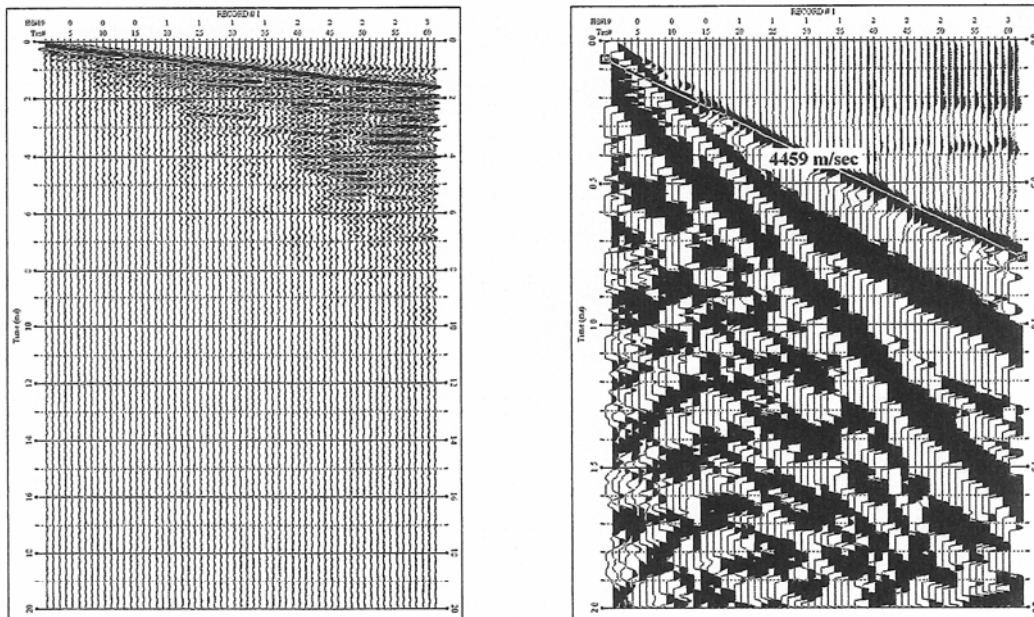


Figure 2: Example of MASW profiles from compartment 1.B7.P1. The figures show the recorded time signals at different distances from the source along the wall. The left figure shows the complete data set from 0 to 20 ms in time and from 0.05 to 3.05 m in distance. Positive amplitudes are filled in with black. The right figure shows the first 2 ms only and the fastest compression wave (P-wave) average velocity is indicated (4459 m/s). The slope of the P-wave arrivals is slightly "bending up" towards higher velocities at further distances. This indicates that the P-wave velocity in the concrete is increasing with increasing depth from the surface.

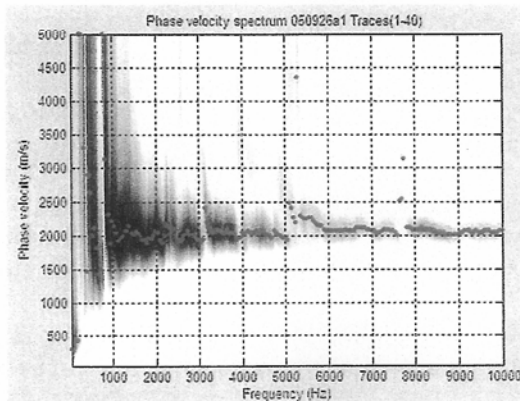


Figure 3: Example of MASW profiles from compartment 1.B7.P1. This figures show the corresponding phase velocity spectrum obtained from the raw data displayed on the previous slide. The phase velocity is the velocity at different frequencies over the measured distance. In this case frequencies lower than about 2000 Hz are influenced by the thickness of the wall. Higher frequencies can provide information about the variation (if any) in velocity through the concrete wall. The highest frequencies (10 000 Hz) are only affected by the near surface material and lower frequencies penetrate deeper into the wall. This example does not indicate any significant difference in velocity (stiffness) through the wall.

14. Examinations of the containment structures of OL1 and OL2 (2006), FORCE TECHNOLOGY, Jesper Staerke Clausen/Allan Kristensen, 2007, 20 sidor + bil.

Sammanfattning

Rapporten avser den i rapport 13 förutskickade upprepningen av tester i kärkraftverkens reaktorinneslutningar i samband med den större översynen 2006. Testerna har omfattat betongens tjocklek, E-modul, fukthalt och vidhäftning mellan betong och stålplåtsinneslutning. De undersökningar som utförs i samband med denna översyn är tänkta att fungera som nollavläsning inför framtida upprepade tester. Utöver seismiska tester på sex olika nivåer har också borrhärdar tagits ut på tre olika nivåer i reaktorinneslutningarna. Genom de markeringar som utfördes 2005 kan framtida undersökningar garanteras äga rum på korrekta platser. Mätningar har utförts enligt nedan med angivna syften:

Ytvågsmätning MASW:	Bestämning av hastighet för Rayleigh-vågor och E-modul
Ytvågsmätning SASW:	D:o
Stående vågmätning:	Tjockleksbestämning samt djup till stålplåtsinneslutningen

Det är oklart om SASW enbart syftar på utvärderingsmetoden eller om det faktiskt utförts två olika typer av ytvågsmätningar. I det senare fallet är en vanlig konvention att SASW utförs med två sensorer medan MASW utförs med flera sensorer eller simulerad flerkanal-mätning.

Medan ytvågsmätdata från 2005 beribetades manuellt har data från 2006 utvärderats med en helautomatiserad metod med och utan en fönsterfunktion som avlägsnar reflexer från konstruktionsdetaljer. I samband med mätningarna inspekterades de frilagda betongytorna avseende sprickförekomst. De flesta sprickorna var smala och ytliga men det finns platser där de kan ha en sprickvidd om 2 mm och förekomma till djup om 300 mm.

Amplitudspektra visar stor samstämmighet även i högre frekvenstoppar, vilket ger anledning tro att de orsakas av stående vågor mot verkliga diskontinuiteter mot djupet. Mätdata visade också i övrigt god överensstämmelse med data från 2005. Stående vågmätningarna ger också ungefär samma värden som 2005. Detta resultat är intressant eftersom mätningarna 2006 utfördes av en annan person än mätningarna 2005.

Det mest intressanta i denna rapport är redovisningen av proverna på de urborrade betongkärnorna. Om man gick emot ett armeringsjärn avbröts kärnborrningen. Alla kärnor var sammanhängande och visade inga tecken på sprickor. Luftporerna var högst 4-5 mm. En träflisa upptäcktes i en kärna. Våghastighetsmätningar i kärnorna visar på en ökande hastighet / E-modul med djup i betongen, men E-modulernas korrelation med djupet är låg. Den dynamiskt bestämda E-modulen är 1.5 - 2 ggr högre än den statiskt bestämda. Korrelationen mellan uppmätt tryckhållfasthet och djup är också låg. Däremot har formsättningen stor betydelse för hållfastheten, en effekt mest tydlig i inneslutningen i OL1. Glidformsgjutning reducerar entydigt hållfastheten i betongen. Tryckhållfastheten i betongen låg mellan 29.4 - 64.6 MPa i OL1 och 37.6 - 72.6 MPa i OL2, dvs en 100-procentig variationsbredd, medan våghastighetsbestämning i kärnorna varierar med c:a 10% och med ytvågsmetoden i befintlig konstruktion med c:a 20%. Ingen bestämning av Poissons tal redovisas. Fukthalten i betongen bestämdes på fyra olika djup i 30 mm tjocka prover från kärnorna. Fukthalten uppvisar ökande värden med djupet och korrelationen är relativt hög. Dock kan man se att det huvudsakligen är de yttersta 200 mm av betongen som är utsatt för uttorkning.

Framtida tester med den seismiska metoden rekommenderas ske med 4-5 års mellanrum.

Exempel

Reactor	Compartment	Floor level	Wave speed VS [m/s]	Resonant thick. [m]	Wave speed VP [m/s]
OL1	1.B91.29 (outer)	- 2 m	2370	1.12	4434
	1.B91.29 (inner)	- 2 m	2370	1.12	4434
	1.B1.46	+ 3.5 m	2200	0.94	4116
	1.B3.47	+ 14 m	2290	0.93	4284
	1.B5.47	+ 25 m	2200	0.90	4116
	1.B6.29	+ 31.5 m	2100	0.92	3929
	1.B7.P1	+ 36.5 m	2180	-	4078
OL2	2.B91.29 (outer)	- 2 m	2360	1.08	4415
	2.B91.29 (inner)	- 2 m	2360	1.08	4415
	2.B1.46	+ 3.5 m	2300	-	4303
	2.B3.47	+ 14 m	2470	0.85	4621
	2.B5.29	+ 25 m	2350	0.84	4396
	2.B6.29	+ 31.5 m	2300	0.86	4303
	2.B7.P1	+ 36.5 m	2140	-	4004

Table 3. Result from MASW Lamb Wave analysis 050927 (Poisson's ratio 0.30). Data from 2005.

Reactor	Compartment	Floor level	Wave speed Vs [m/s]	Resonant thick. [m]	Wave speed Vp [m/s]
OL1	1.B91.29 (outer)	- 2 m	2333	1.14	4365
	1.B91.29 (inner)	- 2 m	-	-	-
	1.B1.46	+ 3.5 m	2022	0.95	3783
	1.B3.47	+ 14 m	2261	0.92	4231
	1.B5.47	+ 25 m	2142	0.87	4007
	1.B6.29	+ 31.5 m	1902	0.84	3559
	1.B7.P1	+ 36.5 m	2213	-	4141
OL2	2.B91.29 (outer)	- 2 m	2285	1.09	4275
	2.B91.29 (inner)	- 2 m	-	-	-
	2.B1.46	+ 3.5 m	2309	0.75	4320
	2.B3.47	+ 14 m	2237	0.77	4186
	2.B5.29	+ 25 m	2357	0.84	4410
	2.B6.29	+ 31.5 m	2070	0.79	3872
	2.B7.P1	+ 36.5 m	2070	-	3872

Table 4. Result from MASW Lamb Wave analysis 061129 (Poisson's ratio 0.30). Data from 2006.

Reactor	Compartment	Floor level	Wave speed Vs [m/s]	Resonant thick. [m]	Wave speed Vp [m/s]
OL1	1.B91.29 (outer)	- 2 m	2357	1.15	4410
	1.B91.29 (inner)	- 2 m	-	-	-
	1.B1.46	+ 3.5 m	1998	0.86	3738
	1.B3.47	+ 14 m	2166	0.88	4052
	1.B5.47	+ 25 m	2166	0.88	4052
	1.B6.29	+ 31.5 m	1998	0.88	3738
	1.B7.P1	+ 36.5 m	2237	-	4186
OL2	2.B91.29 (outer)	- 2 m	2285	1.09	4275
	2.B91.29 (inner)	- 2 m	-	-	-
	2.B1.46	+ 3.5 m	2309	0.75	4320
	2.B3.47	+ 14 m	2357	0.82	4410
	2.B5.29	+ 25 m	2357	0.84	4410
	2.B6.29	+ 31.5 m	2213	0.84	4141
	2.B7.P1	+ 36.5 m	2046	-	3828

Table 5. Result from MASW Lamb Wave analysis 061129 windowed data (Poisson's ratio 0.30). Data from 2006

15. Nyare metoder för tillståndskontroll av fyllningsdammar, VASO / ELFORSK, Sam Johansson, Maria Bartsch, Ola Landin, J&W Anläggning, Gerhard Barmen, Torleif Dahlin, Peter Ulriksen, Teknisk Geologi LTH, 1995, 71 sidor + bil.

Sammanfattning

Rapporten är en utredning med anledning av Flödeskommitténs riktlinjer, förorsakade av nytt sätt att beräkna dimensionerande tillrinning. I rapporten beskrivs nya metoder för övervakning och undersökning av fyllningsdammar, som kan vara lämpliga idag eller i framtiden.

Övervakning sker ständigt medan undersökningar utförs under begränsad tid.

Lämpliga metoder måste därför finnas både för kontinuerlig mätning och intensifierad mätning. Metoderna har indelats i icke-förstörande metoder, borrhålsmetoder och övriga metoder. De har utvärderats utgående från en modell som baserats på de skadetyper som kan uppkomma i dammar. De föreslagna metoderna kan installeras permanent i en damm och anslutas till en mät dator, där lagring och bearbetning av insamlade data kan ske.

För övervakning gäller generellt att iaktta, analysera och dokumentera. Dokumentation av små, för sig själva kanske obetydliga händelser kan i ett senare sammanhang visa sig vara värdefulla. Vid övervakning önskas information om både korttids- och långtidsförändringar. Av de uppsatta skadetyperna (punkt, plan och diffus) bedöms alla vara lika betydelsefulla vid övervakning.

Övervakning av dammar bör göras med metoder som har hög driftsäkerhet samt är känsliga för förändringar av mätvariablerna.. Mätsystemen måste också vara stabila så att endast verkliga tendenser registreras. Vid övervakning bör även mätningar göras av parametrar som beskriver den påfrestning som dammen utsätts för..

Av de ovan föreslagna nya metoderna (för övervakning) ... kan samtliga installeras permanent i en damm. Mätningar och lagring av mätdata kan datoriseras på plats med möjlighet till central datainsamling via modem för vidare bearbetning. Likaså kan larmnivåer läggas in. Om dessa överskrids utsänder mätsystemet information till driftcentralen.

Det är av stort värde att ha tillgång till de tidsserier kontinuerliga mätningar genererar. Genom dessa får man så småningom ett utmärkt statistiskt underlag för att beskriva den normala variationsbredden som funktion av årstid och driftförhållanden. Med detta material i bakgrunden blir det så småningom möjligt att ha vetenskapligt baserade larmnivåer i form av tvingande regler baserade på statistiskt beräknad avvikelse från det normala för viss tid och visst driftförhållande. Detta har visat sig vara av stor betydelse då krypande förändringar lätt nonchaleras eller bortförklaras om man lämnar till människan att avgöra om larm skall ges, se "Blandarhändelsen", SKI Rapport 2005:49.

Vid incidentundersökningar kan först erfordras att förändringen lokaliseras. Metoder lämpliga för detta behöver inte kunna installeras permanent vid dammarna.

Exempel

NON-DESTRUCTIVE-TESTING	KONTINUERLIG MÄTNING	UTVÄRDERING I 3 DIMENSIONER	UTVECKLINGS-POTENTIAL
Refraktionsseismik	Nej	Nej	Viss
Reflektionsseismik	Nej	Nej	Ja
Ekolod	Nej	Ja	Ja
R-vågsseismik	Nej	Nej	Viss
Georadar	Nej	Ja	Viss
VLF	Nej	Nej	Obetydlig
Slingram	Nej	Nej	Obetydlig
Självpotential	Ja	Ja	Ja
Resistivitet	Ja	Ja	Ja
Resistivitet + Inducerad polarisation	Ja	Ja	Ja
Termografi	?	Nej	Viss

NON-DESTRUCTIVE-TESTING	LÄMPLIGHET FÖR DAMM-UNDERSÖKNING	MATERIAL-BEROENDE	STRÖMNINGS-BEROENDE
Refraktionsseismik	Möjlig	Mätbart	Obetydligt
Reflektionsseismik	Lämplig	Mycket tydligt	Obetydligt
Ekolod	Lämplig	Mycket tydligt	Obetydligt
R-vågsseismik	Möjlig	Mätbart	Obetydligt
Georadar	Lämplig	Mycket tydligt	Obetydligt
VLF	Möjlig	Möjligt	Obetydligt
Slingram	Möjlig	Möjligt	Obetydligt
Självpotential	Mycket lämplig	Obetydligt	Mycket tydligt
Resistivitet	Lämplig	Tydligt	Mätbart
Resistivitet + Inducerad polarisation	Lämplig	Tydligt	Obetydligt
Termografi	Lämplig	Mätbart	Obetydligt

16. Blandarhändelsen, Ludvig Thord, SKI Rapport 2005:49, 66 sidor

Sammanfattning

I september 2003 beslutade Statens kärnkraftinspektion (SKI) att anmäla Barsebäck Kraft AB till åklagarmyndigheten. Anmälan, som är den första i sitt slag, gällde avvikelser från myndighetens föreskrifter om säkerhet i vissa kärntekniska anläggningar och därmed misstanke om brott mot lagen om om kärnteknisk verksamhet. Orsaken till detta stycke juridikhistoria har av både branschen och media kommit att benämnas "Blandarhändelsen"

Under tiden för den årliga revisionsavställningen sommaren 2002 genomförde BKAB en omfattande restaurering av Barsebäck 2:s primärsystem, det s k PRIM-projektet. Bl a installerades en ny typ av termiska blandare, vilka kan liknas vid T-korsningar i det rörsystem som ombesörjer tillförseln av matarvatten till reaktortanken. Blandningsfunktionen syftar till att förhindra termisk utmattnings till följd av att vatten med olika temperatur sammanförs i tre olika blandningspunkter belägna inuti reaktorinneslutningen. Inom BKAB höjdes kritiska röster mot konstruktionen för bristande robusthet och tillverkarens av T-korsningen kompetens. Upphandlingen genomfördes dock enligt plan. Anläggningen togs efter installationen åter i drift den 6 oktober.

Någon månad efter återstarten noterades en oväntad flödesfördelning mellan matarvattensystemets två huvudstråk. Kontrollrumspersonalen och driftstödet antog att flödesavvikelse hörde samman med ett tidigare identifierat problem som redan var under analys, och någon ny analys startades följaktligen inte. Efter ytterligare ett par veckor började man emellertid fundera över om inte matarvattenavvikelse i själva verket utgjorde symptomen av ett nytt problem. Under de följande fyra veckorna uppmärksammades fenomenet alltmer, men det skulle dröja tills den 30 december innan teknikavdelningen tilldelades ett formellt uppdrag så att en fördjupad analys kunde startas.

I början av januari 2003 förvärrades problemen, vilket föranledde att man vidtog handgripliga driftåtgärder i syfte att upprätthålla full reaktoreffekt utan sätta det automatiska hårdberäkningsprogrammet ur funktion. Beslut om att gå ner till kallt avställd reaktor togs den 13 januari med motiveringen att nödvändig felsökning inte kunde göras under drift. Tre dagar senare genomfördes visuell inspektion av reaktorn. Man konstaterade att delar av blandarinsatserna hade lossnat och följt med in i reaktortanken, vilket orsakat flödesblockeringar och nötnings-skador i matarvattenstråken, dock ingen påverkan på bränsleinkapslingen.

Definitions av säkerhetskultur som ges i SKI:s och SSI:s gemensamma publikation *Perspektiv på Kärnkraft*:

Säkerhetskultur är att följa säkerhetsrutinerna för sin egen, för allmänhetens och miljöns skull - inte för att det finns statliga regler och inspektörer.

Uppsatsens huvudtes är att beslutet att ställa av Barsebäck 2 under de omständigheter som karaktäriserar händelsen inte kunde ha fattats på grundval av en utilitaristisk risk-nyttokalkyl av hänsyn till risken för omgivningspåverkan. Sannolikheten för en reaktorolycka måste nämligen stiga en faktor ettusen för att en sådan kalkyl skall leda till avstängning. En moralisk motivering av SKI:s kritik mot att reaktorn inte ställdes av tidigare måste därför grundas på en pliktorienterad moralteori snarare än en utilitaristisk. Som det nu är poängterar definitionen snarare motsatsen då den explicit förnekar att det är pga. reglerna som säkerhetsrutinerna ska följas.

Exempel

Svensk kärnkraftssäkerhet bygger på tillämpandet av den s k *djupförsvarsprincipen*. ”Djupet” beskrivs av fem nivåer, där den första syftar till att eliminera själva förutsättningarna för de händelser som i förlängningen skulle kunna leda till att bränslet kommer i kontakt med omgivningen. Om den sista nivån belastas betyder det att ett utsläpp av radioaktiva ämnen har ägt rum och åtgärderna syftar nu till att lindra konsekvenserna för omgivningen. När SKI kontrollerar att tillståndsinnehavarna uppfyller säkerhetskraven utgör djupförsvarsprincipen bedömningsgrund. Man kontrollerar med andra ord att förutsättningarna för djupförsvaret är uppfyllda. Grundtanken är att om en nivå misslyckas ska nästa träda in. Ett begånget fel eller en brist på en nivå får därför inte äventyra funktionen hos en annan nivå.

Nivå	Syfte	Huvudsakliga medel
1	Förebyggande av driftstörningar och fel	Robust konstruktion och hög kvalitet i utförandet, driften och underhållet
2	Kontroll över driftstörningar och fel	Hög kvalitet i övervakningen och tillståndskontrollen av anläggningen genom tekniska system och administrativa åtgärder
3	Kontroll över förhållanden som kan uppkomma vid konstruktionsstyrande haverier	Effektiva säkerhetssystem och störningsinstruktioner
4	Kontroll över och begränsning av förhållanden som kan uppkomma vid svåra haverier	Förberedda tekniska åtgärder och en effektiv haveriberedskap vid anläggningen
5	Lindrande av konsekvenser vid utsläpp av radioaktiva ämnen till omgivningen	Förberedda åtgärder för en effektiv information till och skydd av befolkningen i närområdet

Djupförsvarets nivåer. (Tabellen är hämtad från SKI rapport 2004:16)

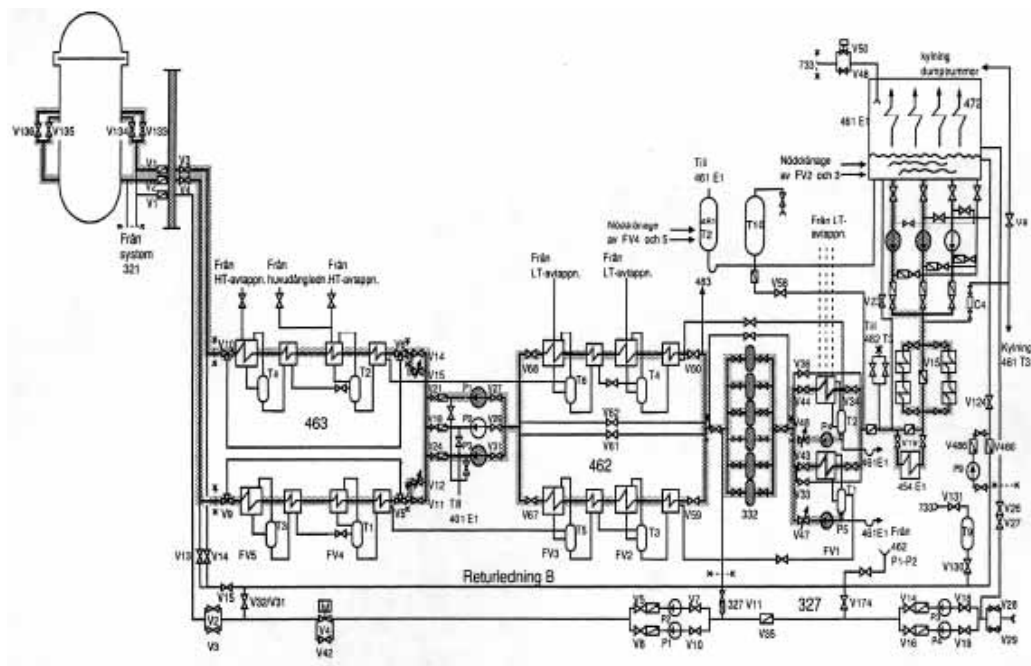
De förutsättningar som anses nödvändiga för att bibehålla djupförsvaret intakt kan sammanfattas under tre punkter:

- Flera fysiska barriärer successivt placerade mellan det radioaktiva materialet och en anläggnings personal och omgivning
- God säkerhetsledning, styrning organisation och säkerhetskultur
- Tillräckliga ekonomiska och personella resurser samt personal som har nödvändig kompetens och som ges rätta arbetsförutsättningar [SKI rapport 2004:16]

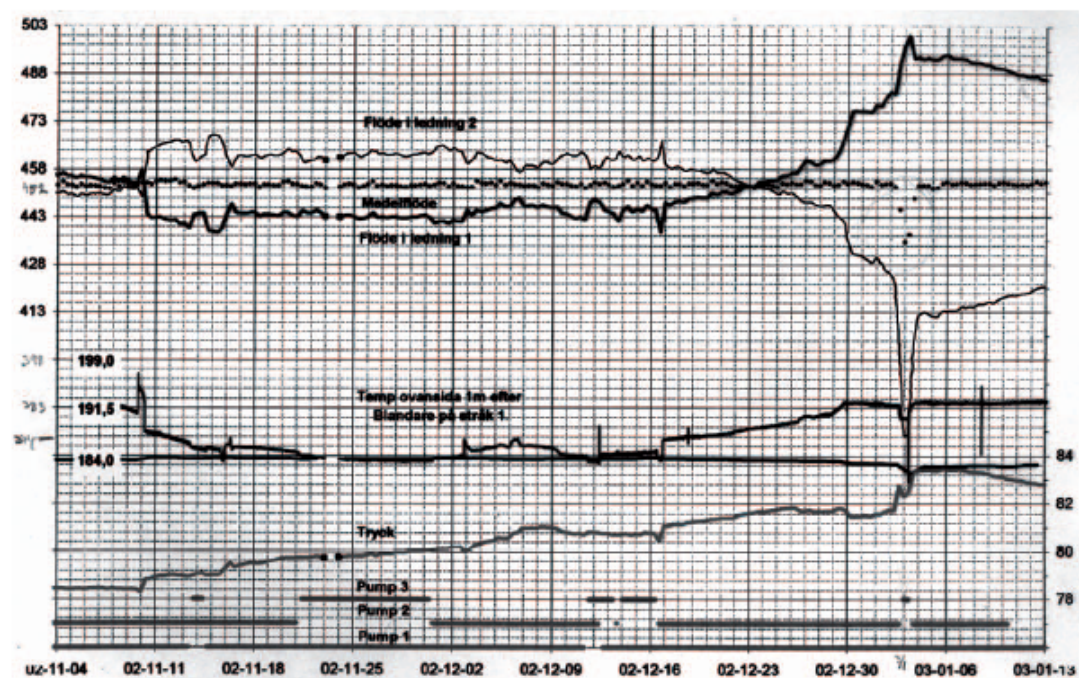
De fysiska barriärerna utgörs i tur och ordning av:

1. Bränslets egen förmåga att kvarhålla de radioaktiva materialet och dess egenskap att inte vara vattenlösligt
2. De gastäta kapslingsrören av zirkaloy
3. Det tryckbärande primärsystemet bestående av reaktortanken med tillhörande kylsystem
4. Den gastäta reaktorinneslutningen av armerad betong
5. Haverifiltret som tillåter kontrollerad tryckavlastning av inneslutningen under det att 99,9% av de radioaktiva ämnen som kan ge markbeläggning hindras från att nå omgivningen.

För att det radioaktiva material som finns i bränslet ska kunna komma i kontakt med omgivningen krävs att samtliga barriärer är satta ur spel. Djupförsvarets två första nivåer syftar bl a till säkerställa barriärernas goda skick.



Diagrammet visar flödet, temperaturen och trycket i matarvattenstråken som funktion av tiden mellan den 4 november 2002 och den 13 januari 2003. Nederst framgår även vilka matarvattenpumpar (P1, P2, P3, jfr. även bilaga 1) som var i drift vid respektive tidpunkt.



17. Högupplösnings tredimensionell impulsradar, LTH Teknisk Geologi, Peter Ulriksen, 1995, 35 sidor + bil.

Sammanfattning

Projektet samfinansierades av BFR, Vägverket, VASO och SBUF. Rapporten diskuterar olika metoder att avsöka en yta och den därunder befintliga volymen med hjälp av impulsradar. Den presenterar utvecklingen av en linjär skanner försedd med hjul, så att den under styrning av en dator kan föra runt en radarantenn i ett sådant mönster att mätpunkter i ett finmaskigt rutnät blir tillgängliga. Ett sådant rutnät innehåller typiskt 256 x 256 mätpunkter. I varje mätpunkt digitaliseras radarsignalen i 256 punkter. Man erhåller således en datamatrix med 256 x 256 x 256 värden. Ur denna kan bildplan skäras ut godtyckligt. Mest intressant är dock att skära ut horisontalplan, vilka representerar objektets radarreflektivitet vid olika djup.

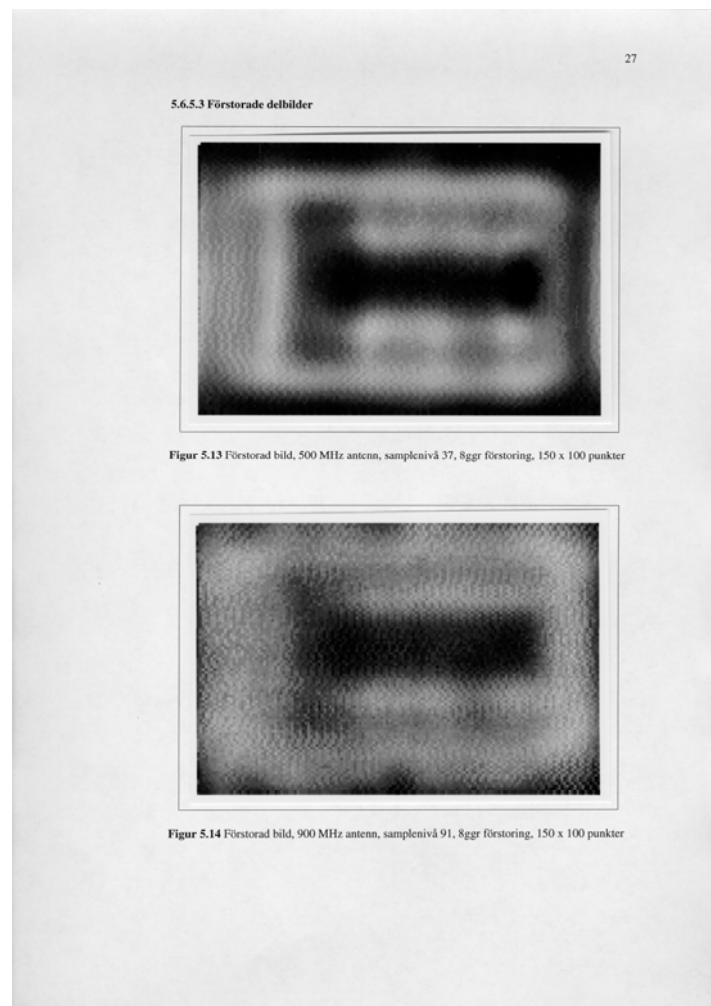
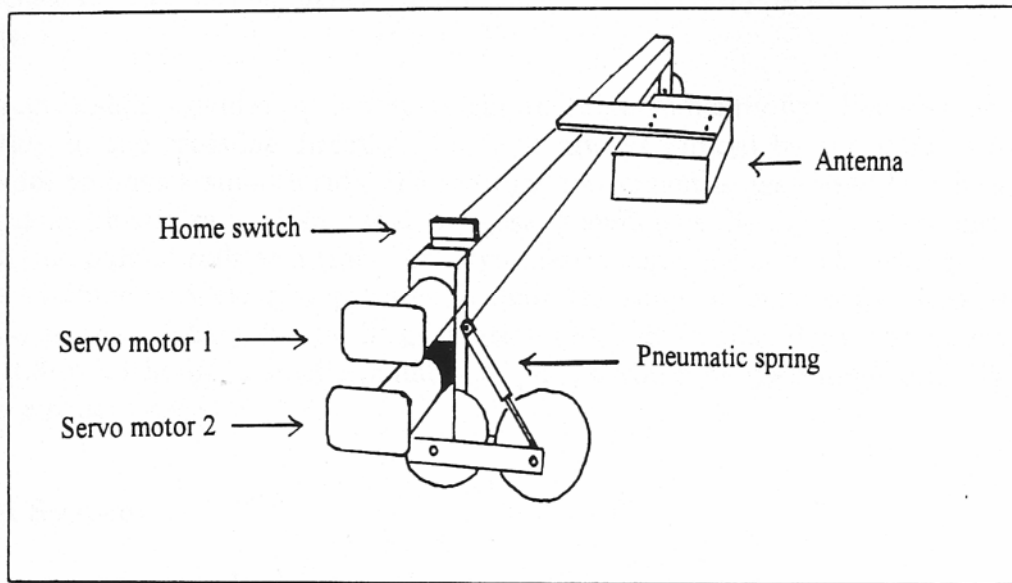
Sättet att presentera sådana data kan varieras och olika tekniker diskuteras. De mest fascinerande metoderna baserar sig på datorer med speciell hårdvara för grafikframställning (1995). På dessa kan man tilldela sina mätdata transparens vid låga mätvärden och olika färger för högre värden på reflektiviteten. Därefter kan mätdata roteras på bildskärmen så att åskådaren kan se in i datamängden och få en klar uppfattning om den inre tredimensionella geometrin i objektet.

I rapporten återges ett antal tillämpningar med skannern. Dessa är dels av typen fältförsök, dels av laboratoriekaraktär. Fältförsöken har främst tjänat som validering av principer och tekniskt genomförande, medan laboratorieförsöken visar vad som är avbildbart.

I projektet tillverkades åtta provkroppar i betong. Dessa innehåller olika objekt och figurerade skadesituationer. Då dessa block huvudsakligen tillverkades för mer än 10 år sedan har de idag (2007) en fukthalt som påminner starkt om den i betongkonstruktioner som finns under tak. Betongblocken har dimensionen 1200 x 800 x 400 mm och är av transportskäl placerade på lastpallar.

Den tillverkade skannern är 4.5 m lång och kan alltså svepa av en yta som är drygt 4 m bred. I längsled begränsas skannerns rörelse endast av de kablar som förbinder den med dator och styrsystem för servomotorerna.

Exempel



Ingjutet plaströr (T-format) avbildat med 500 resp 900 MHz radarantenn

18. Geofysiska metoder för Oförstörande Provning och kartering, Peter Ulriksen LTH och Ulrika Wiberg VATTENFALL UTVECKLING AB, 1998, 84 sidor.

Sammanfattning

Tillståndskontroll av betong är en viktig del i bestämningen av konstruktioners kondition. Utveckling av automatiserade oförstörande metoder är angelägen för effektivare kontrollmöjligheter vid detaljgranskning där omfattande provtagning med urborring av kärnor inte är lämplig. Teknologi för att med tvådimensionell avsökning skapa tredimensionella radarbilder har tidigare utvecklats. I denna rapport behandlas tillverkning av en mindre och robustare scanner, tillämpning av skannerteknik på andra geofysiska metoder och en inledande satsning att effektivisera skannertekniken. Rapporten består av tre delar

- Mekaniska vågor, speciellt ultraljud och akustisk teknik
- Magnetometri och elektrisk potential
- Planer för en effektivare robot och beskrivning av portalfordon

Ljudvågor har en potential vid detektering av sprickor, delamineringar och andra gränsskikt mot luft och dessutom potential för karaktärisering av materialskador som t ex frostnedbrytning. Vid excitering av ljudvågor i betong måste, till skillnad från vid radarmätningar, sökaren vara i direkt kontakt med betongen eller kopplas via vatten, samtidigt som den måste vara fritt rörlig under avsökningen.

Lämpliga sökare har utvecklats och den akustiska tekniken kan med betydande framgång kartlägga delaminering och porös betong. Tekniken att mäta acceleration kan kvantifiera skadans utbredning i det skannade planet men ger inte någon kvantitativ information om konstruktionens hållfasthet.

Det går med nuvarande utrustning inte att identifiera högre frekvenskomponenter vilka skulle kunna associeras med stående vågor och användas för djupbestämning, men erfarenheter från andra (impact-echo), icke-skannade, akustiska metoder visar att det i princip bör vara möjligt.

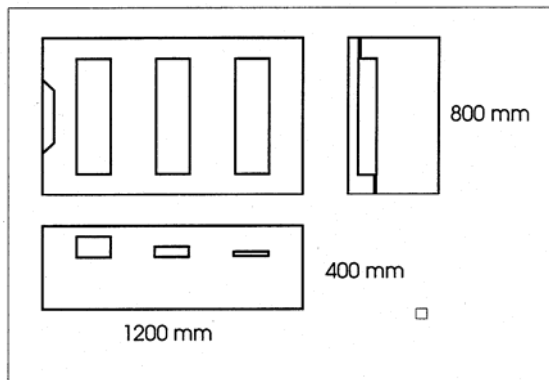
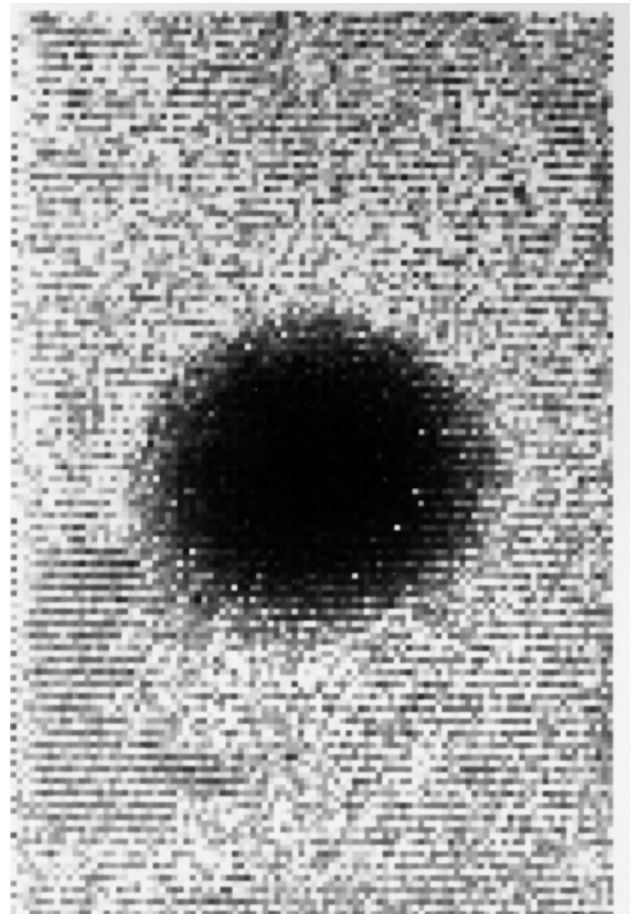
Resultaten från skannade mätningar med ultraljud visar att tekniken behöver utvecklas för att ge önskad avbildningsförmåga. Resultaten är inte tillräckligt entydiga för att man skall kunna dra säkra slutsatser om vad som orsakar registrerade mönster.

Genom samtidig registrering av kraft och acceleration kan framtida akustiska system även ge rent kvantitativ information om betongkonstruktionens eftergivlighet (mobility).

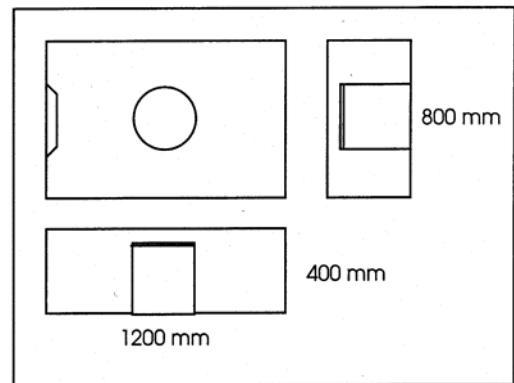
Det är inte möjligt att med magnetiska gradientmätningar, med den känslighet apparaturen har, mäta upp en flytande DC-ström mellan två armeringsjärn, vilket skulle vara en metod att indikera korrosion. En bild som mäts upp ovanför t ex ett armeringsnät kommer inte att se ut som nätet, utan blir en summering av alla de magneter som de i armeringen ingående komponenterna ger upphov till. Skärpan i bilden är avståndsberoende.

Elektrisk AC-mätning verkar användbar, men kontaktmotstånden är betydande. Därför är det svårt att driva någon nämnvärd ström genom mätobjektet. Möjligen kan naturfuktig betong ha så mycket lägre resistans att mätningar möjliggörs. Försök med kapacitiv koppling av ett växelströmsfält bör genomföras. En sådan avsökningsmetod har inget krav på att sensorn är i mekanisk kontakt med det undersökta objektet.

Exempel



Porös betong i form av siporexblock



Delaminering i cirkulär yta

19. Automated performance monitoring of concrete dams, Christian Bernstone. Doktor-savhandling LTH 2006, 94 sidor + 5 artiklar.

Sammanfattning

Tillståndsovervakning i betongdammar har fram till nyligen haft låg prioritet bland de svenska vattenkraftföretagen. Intresset har emellertid ökat på senare tid. Detta orsakas inte så mycket av säkerhetstänkande som insikten att anläggningarna representerar ett mycket stort värde både i form av investering och avkastning. Det innebär att det blir rationellt att optimera underhållet och därmed antalet drifttimar.

En internationell utblick har visat att det i första hand är tre mekanismer man bör övervaka nämligen spricktillväxt, upptryck och dammkrönsdeformationer. Arbetet har inriktats på tre välbeprövade teknologier för övervakningen nämligen reflektometer (TDR), digital bildtagning och bearbetning samt GPS.

TDR för övervakning av upptryck: Utvecklingsarbetet avser en metod för att med TDR mäta vattenstånd i observationsrör i vilka luftfyllda koaxialkablar monterats. Utvärderingen sker automatiskt med hjälp av ett tröskelvärde. Metoden har visat sig fungera under en tre år lång försöksperiod. Efter viss uppsnyggning av mjukvaran antas metodiken kunna tas i bruk. Metoden lämpar sig för fjärravläsning.

Övervakning av deformation med GPS: Den noggrannhet med vilken man kan bestämma små positionsförändringar är avgörande för funktionen hos ett sådant system. Deformationer har simulerats med ett datorstyrt förfarande och det visar sig att noggrannheten ligger i millimeterområdet. Endast datainsamlingen från GPS-mottagarna har kunnat automatiseras i projektet. Positionsberäkningarna har gjorts manuellt. För att kunna utnyttjas i stor skala måste även positionsberäkningarna kunna automatiseras. Apparatur för sådan beräkning finns redan kommersiellt tillgänglig.

Övervakning av deformation med TDR: Programvara för att övervaka deformationer har utvecklats i projektet. Laboratorietester har utförts för att bestämma signalnivåer för avskjuvning av detektorkabeln. Det visar sig att minsta detekterbara deformation är avstånsberoende och uppgår till 2 mm på korta avstånd och 4 mm på längre avstånd. Apparaturen har också testats i fält på en kraftstation, men programvaran är ännu inte mogen att tas i bruk i större skala för insamling av längre tidsserier.

Optisk övervakning av spricktillväxt: En konventionell web-kamera har försetts med programvara som gör det möjligt att övervaka deformationer. Metoden går ut på att ett mönster appliceras på ömse sidor om en spricka eller i ett område inom vilket sprickuppkomst skall övervakas. Genom ett korrelationsförfarande kan man därefter räkna fram deformationer i storleksordningen 0.02 mm, vilket skall jämföras med kammerans pixelstorlek som är 0.22 mm.

Av de undersökta metoderna är den optiska övervakningen av spricktillväxt mest ekonomiskt fördelaktig. GPS är den dyraste metoden.

Exempel

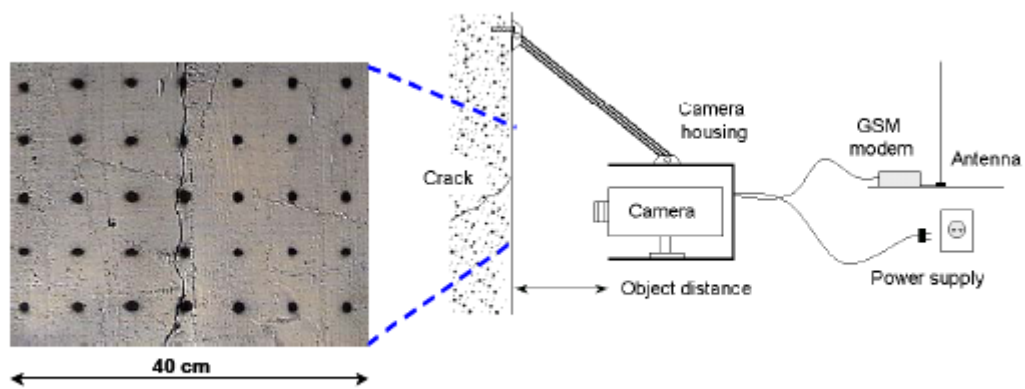


Figure 51. A sketch showing the system outline of the crack monitoring system.

20. Civil Structural Health Monitoring - Strategies, methods and Applications, Doktor-savhandling, Arvid Hejll, LuTU 2007, 97 sidor + 5 artiklar.

Sammanfattning

Den svenska översättningen av titeln på denna avhandling blir *Tillståndsbedömning avkonstruktioner med hjälp av avancerade mätmetoder* vilket är ett vitt begrepp som omfattar kunskapen att vårda och ta hand om befintlig infrastruktur. För att kunna sätta in rättåtgärd vid rätt tillfälle används mätning, övervakning, diagnoser och skadedetekteringsom verktyg i tillståndsbedömningen. Den, från engelska översatta, fortkortning som brukar användas är CSHM (Civil Structural Health Monitoring). CSHM är ett kraftfullt verktyg att bedöma in situ tillståndet eller aktuell prestanda (*performance*) på konstruktioner där nya nedbrytningsmotståndiga material används eller för konstruktionersom förstärkts med hjälp av oprövade metoder.

Motiveringen till att forska och utveckla mätmetoder är den dramatiska byggboomen som skedde på femti- och sextitalet. Många av de konstruktionerna som byggdes under denna tid används än idag trots att de byggdes för helt andra krav och påfrestningar som var aktuella då. De laster som idag påverkar våra konstruktioner är större, snabbare och sker oftare. Den beräknade livslängden på många av våra konstruktioner har redan passerats. Det är omöjligt för samhället att byta ut alla de konstruktioner som kan vara i riskzonen nu eller inom en snar framtid. Därför behövs bättre metoder att bedöma tillståndet så att rätt åtgärder kan sättas in vid rätt tidpunkt. De senaste decennierna har nytt tänkande angående underhåll, inspektioner och tillståndsbedömningar utvecklats. Allt för att fortsatt användande av vår allt mer åldrade infrastruktur skall vara möjligt.

I denna avhandling presenteras en CSHM modell där stokastiska beräkningsmetoder kombineras med avancerade mätningar. Idéer om hur planering, inspektioner, mätstrategier och utvärdering skall läggas upp beskrivs också i metoden.

I avhandlingen diskuteras olika tidsrelaterade strategier för tillståndskontrollen såsom korttids-, långtids-, periodisk, kontinuerlig och triggad övervakning. Till tillståndsstrategierna räknas lokal, global och skadeövervakning. Belastningsfallen indelas i statisk och dynamisk övervakning. Utvärderingsmetoderna som diskuteras är en sannolikhetsbaserad CSHM-metod och FEM-beräkningar.

En stor del av arbetet avser förstärkning med påklistrade kolfibermattor på betong, bl a avseende Gröndalbron, byggd 2000 som en lådbalkbro.

De mättekniker som diskuteras linjärtransformator (LVDT), laser, hydrostatiska system, GPS, inklinometrar, fiberoptiska sprickdetekteringssystem, accelerometrar. Dessutom diskuteras skannande och inbygda sensorer.

Det finns flera guider för *Tillståndsbedömning av konstruktioner med hjälp av avancerade mätmetoder*. International Society for Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructures ISHMI (2007) rekommenderar: ISIS Canada 2002, SAMCO BAM (2006), Federation International de Beton FIB (2002), ISO och Drexel.

Ett intressant försök med modexitering av en hel spännkabelbro redovisas i en av artiklarna.

Exempel

Table 2.1 Examples of structural phenomena, strategies and suitable sensors. T: Time dependent strategies, C: Condition dependent strategies and L: Load dependent strategies

Phenomenon	Monitoring Strategies	Suitable sensor types	Comments
1 Foundation displacement and settlements	Local ^C Continuous ^T Static measurement ^L Long-term ^T	LVD Laser Hydrostatic liquid systems All types	Reference position is important Whether dependent, no Accuracy limitations
2 Displacement	Global ^C Short-term ^T or Long-term ^T Periodic ^T or Triggered ^T Static ^T or dynamic ^T	LVD Laser GPS	Reference position is important Whether dependent Accuracy limitations
3 Inclinations and Rotations	Local ^C Short-term ^T or Long-term ^T Continuous ^T	Inclinometers	Slow sample rates
4 Crack detection and localisation	Damage detection ^C Global ^C Dynamic ^T	Fiber optical crack detection systems	Unpractised
5 Crack widths	Local ^C Damage detection ^C Periodic ^T Static ^L	LVD Crack sensors	Stable, only local monitoring possible Possibility to detect cracks
6 Vibrations	Global ^C Short-term ^T Periodic ^T Continuous ^T Triggered ^T Dynamic ^L	Accelerometers	Expensive
7 Corrosion	Local ^C Long-term ^T Continuous ^T Static ^L	Scanning sensors Imbedded sensors	Manually triggered. Only possible to install at new structure

Bilaga 2

Metodanvändningstabell

METOD / RAPPORT	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	Σx
Ultraljudtransmission	x				x			x													3x
Ultraljudreflektion	x			x														x			3x
Stående vågor	x							x	x	x			x	x							6x
Ytvågseismik	x			x				x		x	x		x	x							7x
Akustisk emission	x									x	x										3x
Termografi	x																				1x
GPR Radar	x		x	x		x	x	x		x	x		x								9x
Skanner (ex vis radar)	x									x							x			x	4x
Resistivitet	x																				1x
Högenergiröntgen	x			x		x	x	x	x	x	x		x								9x
Skjuvvågreflektion		x					x	x	x				x								5x
Borrhålsvideo			x																		1x
Caliperlogging			x																		1x
Kärnborr					x																1x
Galvanostatik								x													1x
Ultraljudövertoner										x											1x
Optiska metoder										x									x	x	3x
Relativ fukthalt											x										1x
Täckskiktmätning													x								1x
Magnetometri																		x			1x
Elektrisk potential																		x			1x
TDR																			x		1x
GPS																			x	x	2x
Inbygda sensorer																				x	1x
Impulsresponspektrum																		x			1x

Tabell 1. Fetstil indikerar mest använda metoder respektive de metoder (x) som särskilt rekommenderas i rapporterna 1-20. Fetstil i rapportnummer indikerar rapport med speciellt värde.

Bilaga 3

REFERENSGRUPPEN FÖR OFÖRSTÖRANDE PROVNINGSMETODER I BETONG (NDT-Gruppen)

Konstituerades på KTH-BB 870616, på initiativ av Hans Ingvarsson, VV

1987

Hans Ingvarsson, VV ordf
Claes-Göran Rydén, VV
Christer Molin, SP
Per Johan Jönis, SP
Ulrika Wiberg, KTH-BB
Peter Ulriksen, LTH-Geo

1988

Hans Ingvarsson, VV ordf
Claes-Göran Rydén, VV
Kent Gylltoft, SP
Sepehr Mohager, SP
Lennart Ågårdh, SP
Jan Alemo, Vattenfall
Boris Steorn, Stockholms Gatukontor
Ulrika Wiberg, KTH-BB
Peter Ulriksen, LTH-Geo

1989

Hans Ingvarsson, VV ordf
Claes-Göran Rydén, VV
Kent Gylltoft, SP
Sepehr Mohager, SP
Lennart Ågårdh, SP
Jan Alemo, Vattenfall
Ulrika Wiberg, KTH-BB
Peter Ulriksen, LTH-Geo

1995

Claes-Göran Rydén, VV ordf
Lennart Ågårdh, SP
Ulrika Wiberg, KTH-BB
Tadeusz Stepinski, Teknikum Uppsala
Lars Gustavsson, Banverket
Lars Johansson, CBI
Peter Ulriksen, LTH-Geo

Gruppen upplöstes och det bildades en betongavdelning inom Föreningen för Oförstörande Provning - FOP 1997. Denna avdelning har dock aldrig befolkats.

29 augusti 2002 anordnade CBI, KTH Brobyggnad och VBT-konsortiet en workshop avseende "Diagnos av bärande konstruktioner". Deltagare var följande personer:

Claes Alén SGI
Jan Alemo VUAB
Patrick Andersson LTH
Mehdi Bahrekazemi KTH
Christian Bernstone VUAB/LTH
Per Boman SL
Behnam Dalili NCC
Thomas Erenmalm RAÄ
Manouchehr Hassanzadeh LTH
Göran Holm SGI
Mårten Janz CBI
Joakim Jeppsson LTH
Lars Johansson CBI

Björn Lagerblad CBI
Bertil Nyman Sycon
Katarina Paulou Skanska
Jonathan Paulsson-Tralla Sycon
Örjan Petersson CBI
Thomas Pettersson Strängbetong
Ebbe Rosell VV
Nils Rydén PEAB/LTH
Iadh Saleh Skanska
Johan Silverbrand CBI
Peter Ulriksen LTH
Elena Österberg SKI

Av de tio presentationerna handlade något fler om system för diagnos (CONTECVET, REHABCON) än om tekniska diagnosmetoder.

Bilaga 4 Svenska aktörer inom OFP

Bodycote Materials Testing AB

Nils-Erik Adolfsson

www.bodycote-mt.se **Bycotest AB**

Bo Björk

www.bycotest.com **CSM NDT**

Certification AB

Lars Gustafsson

www.csmndtcert.se **EFTAB**

Klas Fältström

www.eftab.se **Eurocert AS**

Tore Olsen

www.eurocert.no **FORCE Technology**

Sweden AB

Hans Andersson

www.forcetechnology.se **GE Inspection**

Technologies

Erik Jansen

www.geinspectiontechnologies.com **Greiff**

Industrimiljö AB

Mats Höglund

www.greiff.se **Holger Andreasen AB**

Anders Wirström

www.holger.se **Inspecta Swdeen AB**

Roger Gustafsson

www.inspecta.se **Jernkontoret**

Sven Sundberg

www.jernkontoret.se **Karl Deutsch**

Nordiska

Thomas Ringvall

www.kdn.se **KmK Instrument AB**

Karl Kalbhenn

www.kmk-instrument.se **Kontrollmetod AB**

Håkan Andersson

www.kontrollmetod.se **Kvalitetsteknik**

NDT AB

Sven Severin

www.kvalitetsteknik.com **LABINO AB**

Lisel Rehn

www.labino.se **MA Nordic AB**

Per Nilsson

www.manordic.com **NDT Training**

Center AB

Claes Eriksson

www.ndttraining.se **Nordic NDT AB**

Jan Sundström

www.nordicndt.se **Novanik AB**

Allan Eriksson

www.novanik.se **NYLI Kvalitets- & Kontrollteknik AB**

Andreas Thorn

www.nyli.se **Outokumpu Stainless**

Tubular Products AB

Björn Zetterberg

www.outokumpu.com **Physical Acoustics Scandinavia**

Leif Norman

www.pacndt.com **Ruukki**

Pentti Rehn

www.ruukki.se **Safe Control NDT AB**

Lars Carlsson

www.safecontrol.se **Sandvik Materials Technology**

Jan-Erik Bohman

www.sandvik.se **Sapos AB**

Pär Holman

www.sapos.se **Scania AB**

Krister Johansson

www.scania.se **SKF Sverige AB**

Pekka Juuti

www.skf.se **SQC Kvalificeringscentrum AB**

Ulrika Wiberg

www.sqc.se **TRK**

Kontrolladministration AB

Hans-Åke Kristiansson

www.trkab.com **Uddeholm Tooling AB**

Roul Steiner

www.uddeholm.se **UNITEK AS**

Dag Arnfinn Nilsen

www.unitek.no **WesDyne TRC AB**

Hans Eriksson

www.wesdyne.com **ÅF Kontroll AB**

Jörgen Backersgård

www.af.se