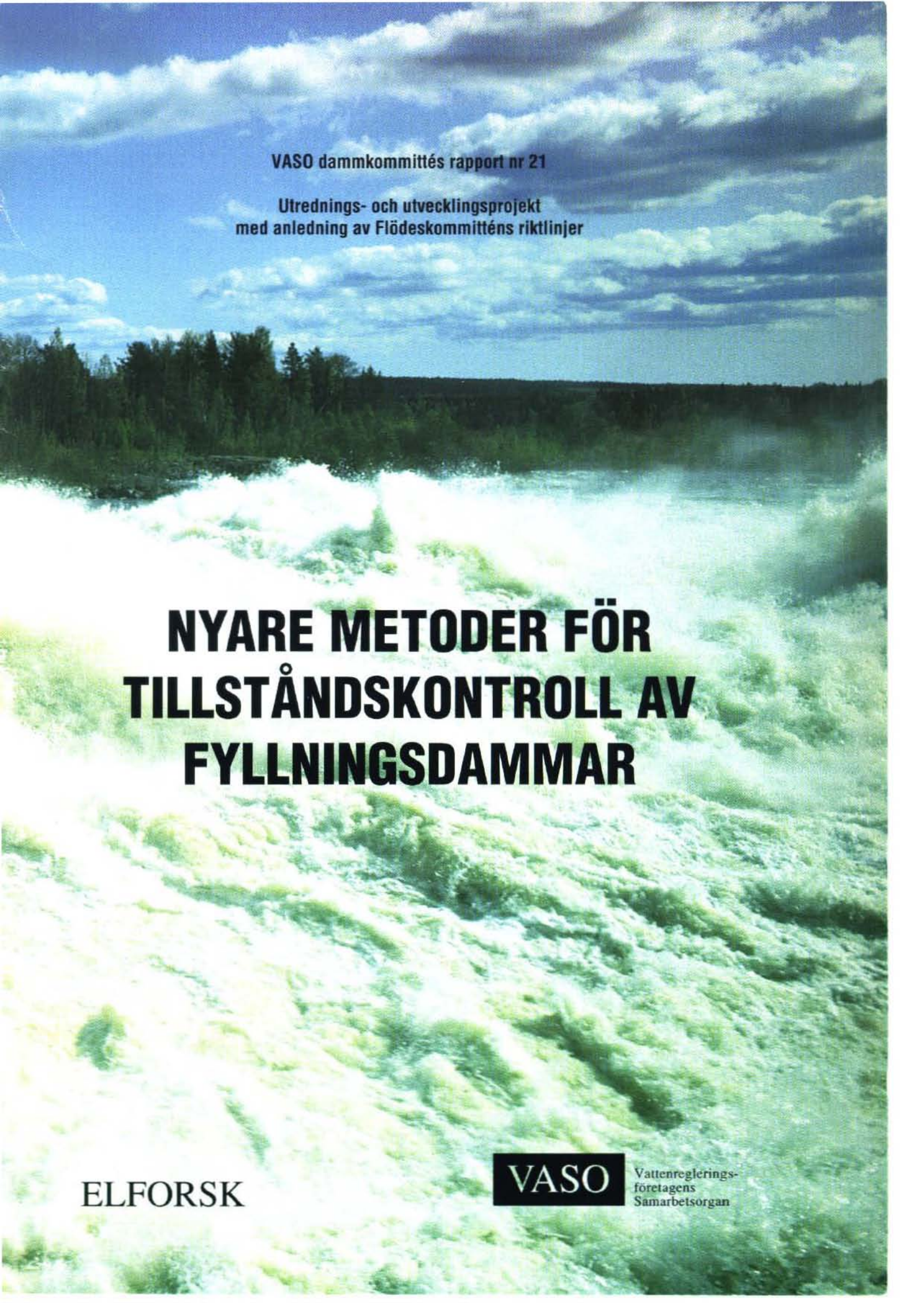




VASO dammkommittés rapport nr 21

Utrednings- och utvecklingsprojekt
med anledning av Flödeskommitténs riktlinjer

NYARE METODER FÖR TILLSTÅNDSKONTROLL AV FYLLNINGSDAMMAR

ELFORSK

VASO

Vattenreglerings-
företagens
Samarbetsorgan

VASO dammkommittés rapport nr 21

**Utrednings- och utvecklingsprojekt
med anledning av Flödeskommitténs riktlinjer**

NYARE METODER FÖR TILLSTÅNDSKONTROLL AV FYLLNINGSDAMMAR

**Sam Johansson, Maria Bartsch, Ola Landin
J&W Anläggning AB, Vatten och miljö**

**Gerhard Barmen, Torleif Dahlin, Peter Ulriksen
LTH, Institutionen för teknisk geologi**

Omslagsfoto: Bengt Johansson, Vattenfall
Grafisk form: Fras&Form
Tryck: Tryckarna AB 1995
ISSN 1400-7827

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

FÖRORD	i
SAMMANFATTNING	ii
SUMMARY	iii
1. INLEDNING	1
1.1. Projektets bakgrund och syfte	1
1.2. Organisation och uppläggning	2
1.3. Läsanvisning	2
2. ÖVERVAKNING OCH UTVÄRDERING AV DAMMARS SÄKERHET	3
2.1. Övervakning	3
2.2. Incidentundersökning	3
2.3. Förändringar i fyllningsdammar	4
3. MÄTMETODER	11
3.1. Inledning	11
3.2. Geofysiska metoder	11
3.2.1. Akustiska metoder	11
3.2.1.1. Refraktionsseismik	12
3.2.1.2. Reflektionsseismik	14
3.2.1.3. Ekolod	17
3.2.1.4. Ytvågsseismik	19
3.2.1.5. Läckljudsmätning / akustisk emission	20
3.2.2. Elektriska metoder	22
3.2.2.1. Självpotential	23
3.2.2.2. Resistivitet	27
3.2.2.3. Inducerad polarisation	30
3.2.3. Elektromagnetiska metoder	32
3.2.3.1. VLF	32
3.2.3.2. Slingram	33
3.2.3.3. Georadar	34
3.2.3.4. Borrhålsradar	38
3.2.4. Radioaktiva metoder	41
3.3. Analys av läckagevatten	44
3.3.1. Hydrokemisk analys	44
3.3.2. Turbiditetstest	45
3.3.3. Spårämnesförsök	46
3.4. Temperaturmätningar	49

4.	BEDÖMNING AV MÄTMETODER	52
4.1.	Allmänt	52
4.2.	Parametersamband vid inre erosion	52
4.3.	Utvärderingsmetodik	54
4.4.	Borrhålsmetoder	55
4.5.	Icke förstörande metoder	56
4.6.	Övriga metoder	59
5.	METODER FÖR KONTINUERLIG ÖVERVAKNING	60
5.1.	Mätproblem och systemkrav	60
5.2.	Mätmetoder	60
5.3.	Instrumentering	61
6.	METODER FÖR UNDERSÖKNING AV BEFINTLIG ÖVERDÄMNINGSFÖRMÅGA	62
6.1.	Mätproblem	62
6.2.	Mätmetoder	62
7.	METODER FÖR INCIDENTUNDERSÖKNINGAR	63
7.1.	Mätproblem	63
7.2.	Lokalisering av förändringar	63
7.3.	Konsekvenser av förändringar	63
7.4.	Fallstudier	64
8.	SLUTSATSER	65
9.	REFERENSER	67
10.	BILAGOR	71
Bilaga 1	Samband för beräkning av parametrars känslighet vid förändrad porositet	
Bilaga 2	Jämförelser av mätmetoder	
Bilaga 3	Praktikfall nya metoder, Uljua, Finland	
Bilaga 4	Praktikfall nya metoder, Peruca, Kroatien	

FÖRORD

Vattenkraftutbyggnaden och därmed byggande av stora dammar startade i stor skala i Sverige efter andra världskriget och var mest omfattande under 50- och 60-talen.

Principerna för utformning och konstruktion av dammanläggningarna under denna intensiva utbyggnadsperiod äger i huvudsak sin giltighet fortfarande.

Vad avser krav på utskovens avbördningsförmåga har dessa föreslagits av dammägarna och (efter eventuella justeringar) fastställts av vattendomstol med SMHI som sakkunnig. Kriterierna i detta avseende kan därför sägas ha etablerats gemensamt av dammägarna och SMHI.

Under 1980-talet ifrågasattes i Sverige, såsom tidigare skett i många andra länder, de etablerade principerna för utskovsdimensionering. Flödeskommittén, som tillsattes av kraftindustrin och SMHI för att utreda flödesriskerna, föreslog i sin slutrapport ett nytt sätt att beräkna dimensionerande tillrinning. Kriterierna innebär att dammar med allvarliga brottkonsekvenser skall kunna klara ett påtagligt högre tillflöde än vad man tidigare räknat med.

För att på ett säkert och kostnadseffektivt sätt kunna anpassa dammbeståndet till de nya kraven har ett stort antal utredningar och utvecklingsprojekt genomförts. Dessa projekt har genomförts på uppdrag av VASO dammkommitté, som är kraftindustrins gemensamma organ i dammsäkerhetsfrågor och bland annat har till uppgift att samordna dammarnas anpassning till de nya riktlinjerna. Den styrgrupp som lett arbetet har bestått av Harald Eriksson - Sydkraft, som varit ordförande, Sten Lasu - Svenska Kraftverksföreningen, Lennart Markland - Vattenregleringsföretagen samt Malte Cederström och Urban Norstedt - Vattenfall.

För varje projekt finns en rapport och därtill finns en sammanfattande rapport över hela arbetet, huvudrapporten (nr 1), vilken även innehåller en sammanställning över de rapporter som ingår i serien.

Föreliggande projekt har genomförts av J&W Bygg & Anläggning AB i samarbete med LTH, avdelningen för teknisk geologi. I projektet har följande personer deltagit: Sam Johansson, projektledare), Gerhard Barmen, Maria Bartsch, Torleif Dahlin, Ola Landin och Peter Ulriksen. Projektets styrgrupp har utgjorts av Arne Ericsson, Graningeverket AB, Harald Eriksson, Sydkraft, Åke Nilsson, VBB VIAK och Gunnar Sjödin, Vattenregleringsföretagen.

I rapporten beskrivs nya metoder för övervakning och undersökning av fyllningsdammar, som kan vara lämpliga i dag eller i framtiden. Metoderna har utvärderats med hänsyn till de skadetyper som kan uppkomma i dammar. Vidare har metoderna indelats i icke förstörande metoder, borrhålsmetoder och övriga metoder.

SAMMANFATTNING

Mätningar i dammar görs för att övervaka dessa samt vid behov även för att utförligt undersöka dammarnas status. Övervakning sker ständigt medan undersökningar utförs under begränsad tid. Lämpliga metoder måste därför finnas både för kontinuerlig och intensifierad mätning. I denna studie har olika metoder inventerats i syfte att finna "nya" mätmetoder som kan vara lämpliga för olika mätningar i fyllningsdammar idag eller i framtiden.

Metoderna har utvärderats utgående från en modell som baserats på de skadetyper som kan uppkomma i dammar. Av denna framgår att hur inre erosion utvecklas är av avgörande betydelse för flertalet skadetyper uppkomst och omfattning. Genom översiktliga studier av hur inre erosion kan utvecklas har visats att strömningsrelaterade mätparametrar ger större mätbara förändringar än materialrelaterade mätparametrar. Metoder som mäter flödesberoende parametrar bör därför eftersträvas. Metodernas användningsområde bestäms också av deras noggrannhet och upplösning. En utvärderingsmodell har därför framtagits där dessa faktorer beaktats. Metoderna har indelats i icke förstörande metoder, borrhålsmetoder och övriga metoder.

För både övervakning och undersökning av dammar finns idag nya metoder som är eller kan bli bra komplement till befintliga metoder. De nya metoderna kan dock ej ersätta de hittills använda metoderna. Den erfarenhet som erhållits med gamla metoder är värdefull, varför pågående mätningar ej bör avslutas.

För övervakning bedöms självpotentialmätningar (SP), resistivitetsmätningar och temperaturmätningar vara lämpligast för komplettering av befintliga metoder, vanligen flödesmätningar. De två förstnämnda metoderna kan utföras från dammkrönet och kan därmed täcka in hela dammens längd. På sikt bedöms att flödesmätningar kan kompletteras med turbiditetsmätningar (grumlighetsmätningar) samt hydrokemisk analys av läckagevattnet. Alla de här beskrivna metoderna kan installeras permanent i en damm och anslutas till en mät dator, där lagring och bearbetning av insamlade data kan ske.

För undersökning av en damms överdämningsförmåga ger befintliga metoder i allmänhet tillräcklig information. Om man önskar att bestämma tät kärnans nivå kontinuerligt längs dammen kan dock georadar användas.

Vid incidentundersökningar kan först erfordras att förändringen lokaliseras. För detta ändamål bedöms självpotentialmätningar (SP) vara den lämpligaste metoden eftersom den kan utföras snabbt. Metoden har dock bara använts en gång i Sverige. Lämpliga metoder är även resistivitetsmätning och georadar eftersom dessa enkelt kan utföras utmed dammen utan några störande ingrepp. Då en förändring lokaliserats kan metoder med högre upplösning väljas för att undersöka dess omfattning och ge underlag för bedömning av dess betydelse. Bland dessa metoder kan nämnas borrhålsradar och Sonic Cross-hole. I många fall kan också temperaturmätningar ge viss information. Traditionellt används borrhning och/eller sondering för detta ändamål och förmodligen kommer borrhning inte att kunna ersättas med "nya" metoder. Borrhningarnas informationsgrad kan dock ökas genom installation av mätrör som kan användas för andra mätningar. Om så är möjligt bör plaströr väljas eftersom dessa erfordras vid mätningar med borrhålsradar.

SUMMARY

Measurements in embankment dams are made for continuous monitoring of important parameters and also for the special examination of additional parameters to ensure that the information is comprehensive, which may be essential when estimating the status of the dam. In this study, new methods (ie. methods with either no or limited experience from embankment dam examinations) have been investigated to find methods both for continuous monitoring and single more detailed measurements.

The methods have been evaluated by a model, based on different categories of damage. Many types of damage, such as piping and arching, are related to internal erosion. Other damage categories, such as damage to the rip-rap, can often be observed by visual inspections.

Parameters influenced by internal erosion (expressed by increasing porosity) have been examined in order to identify those most appropriate for further observation. This has shown that parameters that are dependent on the changes of the flow, such as hydraulic conductivity, are more sensitive than parameters dependent on changes of the soil matrix, for example density and resistivity. The evaluation model also includes an assessment of accuracy and resolution. The methods have been divided into Non-Destructive Testing methods, Borehole methods and Other methods. Major conclusions regarding the most appropriate methods are summarized below.

Non-Destructive testing

GROUND PENETRATING RADAR measures differences in electric conductivity or in radio wave velocity in the soil. These parameters depend on grain size and porosity. The potential for the method is examination, if possible by repeated measurements.

The RESISTIVITY in embankment dams is mainly dependent on water content. At present resistivity measurements are quick but the accuracy is presently not so high. However, the method can be further developed.

Different rates of leakage water will cause anomalies in the SELF-POTENTIAL along the dam. These variations can be used for leakage detection. Measurements of resistivity and self-potential are suitable both for regular monitoring and for more detailed examinations of dams.

Borehole methods

The basic principle for BOREHOLE RADAR and ground penetrating radar is the same. By using tomographic analyses on measurements between two boreholes, the accuracy can be increased. The method is appropriate for single examinations of dams.

The SONIC CROSS-HOLE and the borehole radar methods use a similar technique, but instead of analysing electromagnetic waves the Sonic Cross-Hole method analyses sound waves. The methods are very much the same regarding accuracy and applications.

TEMPERATURE acts as a tracer in the leakage flow and is therefore dependant on the flow. Measurements are easy to perform. The best result will be obtained with regular measurements for monitoring of dams.

Other methods

By continuous HYDRO-CHEMICAL analyses, variations in the quality of the leakage water can be detected and used as an indication of changes inside the dam. With increasing leakage, the TURBIDITY (ie. the content of particles in the water) can also indicate internal erosion. If the leakage or movements inside the dam cause noise, these can be detected by ACOUSTIC measurements.

Result

Today, there are some new methods available for regular monitoring and for single detailed examination in embankment dams. At the moment these new methods cannot replace conventional ones. Since the experiences from old measurements are also considered to be valuable, an interruption of existing measurements is not to recommend.

Monitoring of dams can be made by measuring SELF-POTENTIAL, RESISTIVITY and TEMPERATURE. The first two methods are Non-Destructive and can be installed for measurements covering the whole dam. Temperature measurements are made in boreholes or in some cases from the surface using infrared cameras. Hydro-chemical and turbidity measurements in the leakage water can also be used for monitoring. However, the accuracy of these methods is strongly affected by the way in which the leakage water is collected. If flow measurements are made for the entire dam, the local increased flow (due to internal erosion) must be relatively large before it becomes significant. All these methods can be installed permanently. They can also be controlled by a computer for storage and evaluation of data.

None of these new methods are generally recommended for examination of the capacity to allow water level above reservoir water level. However, georadar measurements can be useful to identify sections with low levels of the core crest.

The location of the leakage must be known before a detailed investigation. Thus, quick and non-destructive methods such as SELF-POTENTIAL, GEORADAR and RESISTIVITY measurements are recommended, despite little or no experience of the methods in Sweden. After localization of the leakage, more detailed measurements can be made using borehole methods, such as BOREHOLE RADAR and SONIC CROSS-HOLE measurements. In many cases TEMPERATURE measurements can be useful.

1. INLEDNING

1.1. Projektets bakgrund och syfte

Bedömning av dammars säkerhet är viktig och omfattar analyser inom ett flertal områden. Flödeskommitténs arbete indikerar att vattenståndet i magasinen kan komma att stiga ovanför dämningssgränsen vilket medför ökade belastningar på dammarna. Vid undersökning av dammar har framkommit att dess utförande ej i detalj alltid överensstämmer med ursprungliga ritningar. Detta i kombination med dammarnas åldrande medför svårigheter att bestämma dammarnas säkerhetsstatus. Frågor som berör mätningar i dammar kommer därför att få en ökad betydelse i framtiden.

Mätningar i dammar görs principiellt med två olika syften: övervakning och undersökning. Övervakning av dammar sker regelbundet för att följa förändringar i dammen. Mätningar för detta ändamål sker med ett fåtal parametrar med viss regelbundenhet. Vid vissa dammar finns även kontinuerlig övervakning med automatisk dataöverföring. Vid undersökning som initierats av något avvikande parametervärde eller synlig indikation sker utökade mätningar vanligtvis av flera parametrar (incidentundersökning). Dessa mätningar utförs under begränsad tid. Lämpliga metoder måste därför finnas både för kontinuerlig och intensifierad mätning.

De vanligaste metoderna för övervakning är mätningar av vattenläckage, sättningar och vattenstånd. Då en förändring konstaterats sker ytterligare undersökningar, t ex genom sondering eller borming med provtagning. Dessa metoder har använts sedan lång tid och en betydande tolkningserfarenhet har byggts upp. Flertalet av de normalt förekommande metoderna ger punktvis information, varför det med dessa metoder kan vara svårt att få en helhetsbild av förändringar av dammens funktion.

Syftet med denna studie är:

- att inventera "nya" mätmetoder och deras användningsområde för mätningar i fyllningsdammar samt
- att bedöma olika metoders utvecklingspotential för dammundersökningar, främst icke förstörande undersökningar, så kallade NDT-metoder (Non Destructive Testing)

Med "nya" metoder avses metoder som ej använts i någon större utsträckning vid undersökning av dammar. Däremot kan de ha använts inom närliggande områden. Likaså har en del "gamla" metoder medtagits där betydande framsteg gjorts tack vare den tekniska utvecklingen och/eller förbättrad utvärderingsmetodik.

Metoderna utvärderas med avseende på

- användningsområde (t ex undersökning av hela dammen, speciella sektioner eller i enskilda punkter)
- skadetyper/generalitet.

1.2. Organisation och uppläggning

Denna rapport är en redovisning av VASO Dammkommitté projekt Nya metoder för tillståndskontroll och övervakning. Projektet har utförts av J&W Bygg & Anläggning AB (i vilket AIB Anläggningsteknik AB numera ingår) i samarbete med LTH, avdelningen för teknisk geologi. I projektet har följande personer deltagit: Sam Johansson (projektledare), Gerhard Barmen, Maria Bartsch, Torleif Dahlin, Ola Landin och Peter Ulriksen. Projektets styrgrupp har utgjorts av Arne Ericsson, Graningevarken AB, Harald Eriksson, Sydkraft, Åke Nilsson, VBB VIAK och Gunnar Sjödin, Vattenregleringsföretagen. Samtidigt har Åke Nilsson, VBB VIAK på uppdrag av VASO Dammkommitté genomfört ett parallellt projekt, Beprövade metoder för tillståndskontroll och övervakning, jfr Nilsson (1994).

1.3. Läsanvisning

Rapporten beskriver följande frågeställningar beträffande nya metoder och deras användning :

- **Vad** ska mätas? (kapitel 2)
- **Vilka** metoder finns? (kapitel 3)
- **Vilka** metoder är lämpligast för undersökning och/eller övervakning av dammar? (kapitel 4)
- **När** kan de olika metoderna användas? (kapitel 5 – 7)

Den första frågan beskrivs översiktligt för att ge en bakgrund till vilka mätproblem som kan förväntas. Kapitel 2 är därför av inledande karaktär.

Beskrivningen av de olika metoderna (kapitel 3) är allmängiltig, men med speciell inriktning mot undersökning av dammar. Varje metodbeskrivning börjar med en kort sammanfattning, där metodens egenskaper för undersökning av dammar beskrivs kortfattat. Kapitlet kan med fördel användas som "uppslagsbok" då detaljerad beskrivning önskas av någon metod.

I kapitel 4 och i de två följande jämförs metoderna för olika användningsområden. Likaså beskrivs när metoderna bör användas som komplement till befintliga metoder. Dessa kapitel är avsedda att ge viss vägledning för den dammsäkerhetsansvarige, konsulter med flera för att underlätta bedömning av möjligt mätresultat vid olika mätsituationer.

2. ÖVERVAKNING OCH UTVÄRDERING AV DAMMSÄKERHET

2.1. Övervakning

Dammägarna har ansvaret för övervakningen av sina dammar medan Länsstyrelsen utövar den offentliga tillsynen. För övervakning av dammar finns anvisningar framtagna av Vattenfall och Kraftverksföreningens utvecklingsstiftelse (VAST), i vilka följande begrepp används:

- **Tillsyn** utförs regelbundet av driftpersonalen.
- **Inspektioner** utförs 1 à 2 ggr per år i dammägarens regi enligt upprättad inspektionsanvisning.
- **Besiktningar** utförs vart 4:e år av en ansvarig besiktningsman som sedan gör säkerhetsbedömning tillsammans med den dammsäkerhetsansvarige.
- Dessutom kan en fördjupad **dammsäkerhetsutvärdering** utföras med längre intervall.

Med detta material som grund kan också en undersökning om dammens överdämningsförmåga göras med anledning av Flödeskommitténs riktlinjer.

2.2. Incidentundersökningar

Regelbunden övervakning ger möjlighet att registrera avvikande förlopp som eventuellt kan utvecklas till skador i dammen. Normalt orsakas förändringar i dammar av förändrade yttre laster, exempelvis med årstiden varierande vattenstånd. Vid större variationer än normalt kan ett ökat undersökningsbehov vara motiverat för att klargöra förändringens orsak. I många fall kan det vara svårt att i ett inledande skede klargöra orsaken till ett avvikande förlopp. Undersökningar för att klargöra detta har i denna rapport benämnts incidentundersökningar. Med incident menas här således en uppkommen förändring som skulle kunna inverka menligt på dammens funktion. Förändringar kan vara av olika slag och ha varierande omfattning och konsekvenser. Generellt karaktäriseras incidenterna av att en oväntad förändring uppkommit någonstans i dammen. Förändringen kan t ex ha upptäckts genom visuell observation av ett sjunkhål på dammens krön eller genom förändring av mätvärden, exempelvis ett ökat läckageflöde.

Ibland kan förändringens läge ungefärligen fastställas medan detta i vissa fall ej är möjligt. Tillvägagångssättet vid incidentundersökningar måste därför variera från fall till fall. Nedan beskrivs två förenklade exempel på hur incidentundersökningar kan utföras. I flertalet fall består verkligheten av en kombination av dessa exempel. Generellt gäller att undersökningens syfte är att bestämma incidentens orsak, omfattning, konsekvenser och behov av eventuella reparationsåtgärder.

I det första exemplet antas att en betydande ökning av läckaget har registrerats. Läckagets läge är okänt varför den primära frågan blir: Var har förändringen skett? Undersökningarna kan utföras i följande steg:

- 1) Intensifierad övervakning.
- 2) Bearbetning av erfarenheter från driftspersonal, besiktningsprotokoll, byggnadshandlingar för att söka möjliga zoner där läckage kan förväntas.
- 3) Undersökningar enligt ett program baserat på 1) och 2), alternativt undersöks hela dammen.
- 4) Kompletterande undersökningar om så erfordras tills förändringens orsak och konsekvenser kunnat fastställas.

Som framgår av ovanstående utgör övervakning samt bearbetning av erfarenheter från övervakning en betydande del av arbetet i en incidentundersökning. Detta understryker behovet av en väl fungerande övervakning, där noggranna noteringar (tidpunkt och läge) angående observerade förlopp kan vara av stort värde.

En annan situation föreligger då incidenten givit upphov till en synlig skada, t ex ett sjunkhål. I detta fall kan undersökningarna direkt koncentreras till ett bestämt parti av dammen. Den primära frågan blir då: Vad är orsaken till förändringen? Incidentundersökningen kan då utföras i följande steg:

- 1) Intensifierad övervakning speciellt i det skadade området.
- 2) Tolkning av indikationer för att komma fram till en rimlig orsak.
- 3) Undersökningar enligt ett program baserat på 1) och 2) .
- 4) Kompletterande undersökningar om så erfordras tills orsak och konsekvenser kunnat fastställas.

Valet av undersökningsmetoder varierar i de olika exemplen. I det första exemplet är övervakning och metoder som medger undersökning av större områden (på bekostnad av detaljupplösningen) mer intressanta. I det andra exemplet kan metoder med hög detaljupplösning vara av större värde eftersom dessa kan ge ett bättre underlag för en bedömning av skadans orsak.

2.3. Förändringar i fyllningsdammar

Denna studie har koncentrerats på de förändringar i dammarna som kan uppkomma vid tillfällig överdämning vid de dimensionerande flöden som anges i Flödeskommitténs riktlinjer, samt de tidsberoende förändringar som förekommer i dammarna. Fyllningsdammar är till sin natur en konstruktion som tillåter vissa rörelser samt naturlig vattenströmning genom dammen. Dessa processer kan på sikt ge upphov till små förändringar av dammens egenskaper. Uppbyggnaden av dammen är dock gjord så att skador av betydelse ej ska uppkomma på grund av sådana förändringar. Trots detta har skador i vissa fall uppkommit av olika orsaker, vilket framgår av exemplen i figur 1.



Figur 1. Erosionskanal vid spontspets (överst) och sjunkhål på dammkrönet (underst).

I ICOLDs (International Commission On Large Dams) regi har sammanställts statistik över skador och incidenter i dammar, ICOLD (1984). Utgående från denna sammanställning, liksom från de skador som skulle kunna uppkomma i samband med höga flöden, har nedan gjorts ett försök att kortfattat beskriva olika skadors förlopp i syfte att identifiera mätbara parametrar. I denna beskrivning görs dock ingen bedömning om olika parametrars lämplighet.

Det är många gånger svårt att bestämma en huvudorsak till förändringarnas uppkomst eftersom dessa ofta uppkommer som en kombination av flera händelser. I beskrivningen nedan avses ej att fullständigt beskriva förändringars uppkomst och orsaker. Syftet är istället att beskriva vilka mätbara effekter som uppstår och vilka parametrar som berörs. De parametrar som på något sätt påverkas av en förändring i dammen har sedan sammanställts i en tabell.

1 Skred

Brott i undergrunden eller dammkroppen i form av utglidningar uppstår om de fysikaliska förutsättningarna för släntstabilitet överskrids, t ex om släntlutningen är för brant i förhållande till fyllningsmaterialets hållfasthetsegenskaper eller vid en snabb avsänkning av magasinet med tillhörande porttrycksförändring. Viktiga parametrar är porttryck liksom materialets hållfasthet.

2 Deformationer och sättningar

Rörelser i dammar uppkommer normalt vid vattenstånds- och temperaturvariationer. Dessutom kan rörelser uppstå i eller under en damm beroende på grundförhållanden, ojämn packning, valvverkan eller variation av dammens materialsegenskaper. Rörelser kan registreras genom inmätning i x-, y- och z-led. Karakteristiska och detekterbara storheter för zoner där rörelser kan initieras är ökad vattenkvot, lägre densitet och ökad porositet. Dessa egenskaper leder i sin tur till förhöjd permeabilitet och därmed sammanhängande vattenströmning.

3 Hydraulisk uppspräckning

Hydraulisk uppspräckning kan inträffa om vatten från uppströmssidan via en läckageväg kommer i kontakt med tätjord med lägre totaltryck. Dessa förutsättningar kan uppfyllas t ex när sprickor i eller i kontakt med tätkärnan förekommer. Detta kan medföra ökade vattenflöden, samt därav ökad risk för inre erosion och rörelser. Mätbara parametrar är främst porttryck, vattenkvot och flöde.

4 Inre erosion och piping

Inre erosion innebär att läckvatten bortför finmaterial från dammkroppen eller undergrunden. På grund av materialtransporten vidgas läckagevägen samtidigt som strömningshastigheten ökar. Förloppet kan leda till kaviteter och sjunkhål som följd. På samma sätt kan bakåtskridande erosion, piping, utvecklas längs en läckageväg genom tätkärnan då läckagevägar mynnar i ett bristfälligt filter. Orsaker till erosion i dammkroppen kan vara instabilitet i undergrundens eller dammfyllningens material, inhomogeniteter, sprickor i berg, otillräcklig injekteringsskärm samt urlakning av cement eller vattenlösliga mineraler. Mätbara storheter och tecken på inre erosion och/eller piping är ökad porositet och vattenkvot samt ökat läckvattenflöde, med innehåll av finpartiklar (dvs med förhöjd turbiditet). Läckvattnets kemiska sammansättning påverkas av i dammkroppen ingående material liksom av kornfördelningen. Förändrade spänningsförhållanden och förhöjt porvattentryck är andra indikatorer.

5, 6 Sprickor i berggrunden och förändring av injekteringsskärm

Sprickor i berg kan öppnas/vidgas vid ojämna sättningar, horisontella drag- och skjuvspänningar, urspolning av jordpartiklar, urlakning av cement m m. Sprickorna utgör läckagevägar vilket medför att risken ökar för förhöjt läckage, inre erosion, hydraulisk uppspräckning, sönderfall etc. Injekteringsskärmens tillstånd kan kontrolleras genom kemiska analyser där injekteringens sammansättning och täthet vid provningstillfället kan jämföras med motsvarande undersökningar från byggnadstiden. Kemisk analys av läckvatten kan också påvisa urlakning av cement och mineraler.

7 Spontfunktion

Otätheter i en spont utgör potentiella läckvägar liksom otillräcklig packning närmast sponten. Vid läckagestillfällen intill en spont kan höga hastigheter hos läckagevattnet uppstå. Då finmaterial spolas bort bildas inhomogeniteter. Därvid uppkommer inre erosion, vars konsekvenser beskrivits ovan.

8 Inhomogeniteter

Inhomogeniteter kan uppkomma vid dammens uppbyggnad genom variationer i materialsammansättning och packningsresultat. De avvikande egenskaperna medför potentiella svaghets- och skadezoner med variationer vad gäller t ex hållfasthet, spänningar, porttryck, vattenkvot, permeabilitet, korngradering och porositet.

9 Valvbildning

Valvbildning i tåtkärnan kan uppkomma vid ojämn packning av tåtkärnan eller på grund av ojämna sättningar beroende på varierande grundförhållanden. Valvbildning kan exempelvis uppkomma intill betongkonstruktioner eller om sättningarna i tåtkärnan är större än sättningarna i omgivande stödfyllningar. Valvbildning medför minskning av effektivspänningarna och ger således förutsättningar för hydraulisk uppspräckning och inre erosion. Vid packning av jord tvingas små partiklar att flytta sig in i utrymmen mellan större partiklar. Vid packning enbart genom tryck visar partiklarna tendenser till valvbildning, varvid lösa zoner bildas i materialet. Mätbara parametrar är främst porositet och spänningar.

10 Utmattning vid lastväxlingar

Förändringar av magasinets vattenstånd medför variationer i porvattentryck, läckageflöde och spänningar i dammkropp och undergrund. I samband med lastväxlingar kan även rörelser i dammen uppkomma. Dessa effekter kan bidra till att skadliga processer utvecklas med tiden.

11-14 Frostskador, yterrosion, överspolning, överströmning och erosion vid dammtån

Isläggning av magasinet, islinnbildning, tjällyftning, vågor och regn kan leda till rörelser och instabilitet i erosionsskyddet. Genom hålrum i erosionsskyddet kan partikelseparation och urspolning av övergångslagret ske. Kraftiga vågor kan på grund av otillräcklig krönhöjd eller sättningar i dammkrönet även leda till överspolning.

Vid överströmning av dammkrönet finns risk för att dammens nedströmstå eroderas. Sänkning av magasinets nivå vintertid när magasinet är istäckt kan medföra skador på

erosionsskyddet genom isens påverkan. Skador upptäcks ofta genom att erosions-skyddet får ett ordnat utseende. Rörelser kan påvisas genom inmätning av etablerade sektioner. Vid indikationer på skador bör övergångslagrets kornfördelning undersökas. I dammar där en överdämning planeras vid dimensionerande flöden enligt Flödeskommitténs riktlinjer, bör en kontroll av tätkärnans erosionsbenägenhet göras, dvs en bestämning av tätkärnans nivå samt kornfördelningen i tätkärnans ytskikt och ovanliggande lager.

15 Sönderfall (vittring, utlösning, svällning, termiska eller kemiska processer)

Läckvatten kan i vissa fall orsaka urlakning av mineraler och jordpartiklar i sprickor med ökade läckageflöden och inre erosion som följd. Genom kemisk analys av läckvatten kan eventuell urlakning påvisas. Bergets homogenitet kan kontrolleras genom undersökning av dess porositet respektive sprickighet.

I tabell 1 på följande sida visas en sammanställning över de skadetyper, inbyggda fel och yttre faktorer som beskrivits ovan. Parametrar vilka i något skede kan påverka eller påverkas av de medtagna processerna har markerats. Parametrar som fungerar som indikatorer för vissa bestämda förändringar kan när de ej uppvisar avvikande värden ge värdefull information genom att de påvisar vilka slags förändringar som **ej** är aktuella. I denna tabell finns ingen värdering av hur stor påverkan en parameter får eftersom en sådan värdering måste sättas i samband med hur parametern mäts. Likaså har endast skaderelaterade indikationsparametrar medtagits vilka har ett direkt fysiskt samband med skadan. Exempelvis vid inre erosion bortföres finmaterial vilket medför ökad porositet och vattenkvot samt lägre densitet. Parametrar som kan uttryckas som funktion av andra parametrar har undvikits. Som exempel kan nämnas att vattenkvot **ej** har medtagits eftersom den enkelt kan beräknas ur porositeten. Likaså har hydraulisk konduktivitet (m/s) använts i stället för permeabilitet (m^2).

Tabell 1. Sammanställning över skadetyper och tillhörande parameterar som påverkas vid en förändring i dammkroppen.

Primära indikationsparameterar Skadetyper, inbyggda fel, yttre påverkan	Rörelser	Portryck	Flöde	Vattenkvalitet	Temperatur	Spänningar	Sprickvidd	Densitet	Porositet	Hydraulisk	Korngradering	Ljud	Magsinsnivå
1. Skred	X	X	-	-	-	X	X	-	-	-	X	X	X
2. Deformationer, horisontellt och vertikalt	X	-	-	-	-	X	X	X	X	-	-	X	-
3. Hydraulisk uppspräckning	-	X	X	X	X	X	-	X	X	X	-	X	-
4. Inre erosion, piping	X	X	X	X	X	X	-	X	X	X	X	-	X
5. Sprickor i berggrunden	X	X	X	X	X	X	X	-	-	X	-	X	-
6. Injekteringskvalitet	-	X	X	X	X	-	-	X	X	X	X	X	-
7. Spontfunktion	-	X	X	X	X	X	-	X	X	X	X	X	-
8. Inhomogeniteter	-	X	X	X	X	X	-	X	X	X	X	-	-
9. Valvbildning	-	X	X	-	X	X	-	X	X	X	-	-	-
10. Utmattning	X	X	X	X	X	X	X	-	-	-	-	X	X
11. Frostsador	X	-	-	-	X	X	-	X	X	X	X	-	X
12. Ytererosion	X	-	-	-	-	-	-	-	-	-	X	-	X
13. Överströmning av tåtkärnan	X	X	X	X	-	-	-	X	X	-	X	-	X
14. Erosion av dammtå	X	-	X	-	-	-	-	-	-	-	X	-	X
15. Sönderfall	-	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	-	-
SUMMA	9	11	11	9	10	11	5	10	10	9	10	7	8

Parametrarna i tabell 1 har valts med utgångspunkt från den effekt som en förändring ger upphov till. De mest frekventa parametrarna är portryck, flöde, spänningar, temperatur, densitet, porositet och korngradering. Dessa parametrar kan mätas på olika sätt, direkt eller oftast indirekt. Metodernas potential bestäms av deras relativa noggrannhet (mät noggrannhet i förhållande till parametrarnas variation), metodens upplösning samt kostnaderna för att genomföra och utvärdera mätningarna.

Sammanfattningsvis kan konstateras att hur inre erosion utvecklas är av avgörande betydelse för flertalet skadetyper uppkomst och omfattning. De skadetyper som ej med nödvändighet uppkommer tillsammans med inre erosion är:

- yttlig erosion av erosionsskyddet, av dammkrönet eller vid dammtån
- frostsador
- skred
- deformationer/sättningar
- utmattning vid lastväxlingar.

Dessa skadetyper är av mer yttlig karaktär vilka ofta kan registreras med direkta mätmetoder.

Man kan också dela in skadorna med avseende på deras geometriska utsträckning vid mätning i ett vertikalt snitt längs dammen. Därvid kan följande indelning göras:

1. Punktformad, (t ex inre erosion och inhomogeniteter)
2. Plan, (valvbildning, lager med lös packning, hydraulisk uppspräckning etc)
3. Diffus, (större inhomogeniteter).

För utvärderingen har antagits att en punktformig förändring har en tvärsnittsarea av storleksordningen någon kvadratmeter, medan en diffus förändring har ca 10 gånger större area. En plan förändring antas ha en tjocklek av några decimeter och representeras i mätsnittet som en linje.

3. MÄTMETODER

3.1. Inledning

En stor mängd mätmetoder kan användas för undersökning av förändringar i fyllningsdammar. Metoderna kan indelas i följande huvudgrupper:

- Geotekniska metoder
- Geodetiska metoder
- Geofysiska metoder
- Kemiska och fysikaliska metoder
- Mätning av fysiska storheter som temperatur och tryck
- Datorbaserade underhållssystem

Geotekniska och geodetiska metoder har använts relativt länge för övervakning och undersökning av dammar, jfr Nilsson (1994). Där beskrivs även mätning av fysiska storheterna som tryck (portryck) och flöde. Den enda fysiska storhet som beskrivs i denna rapport är därför temperaturmätningar.

I detta kapitel presenteras i huvudsak metoder som inte används standardmässigt för övervakning och undersökning av förändringar i fyllningsdammar. Tonvikten ligger på olika geofysiska metoder, men även kemiska och fysikaliska metoder finns med liksom temperaturmätning och termografi.

Övervakning av förändringar i dammar med hjälp av datorbaserade underhållssystem eller expertsystem är också metoder som inte används standardmässigt. Denna grupp av metoder behandlas inte i denna rapport eftersom dessa främst innebär en automatisk bearbetning och tolkning av insamlade mätdata från beprövade eller nya metoder.

3.2. Geofysiska metoder

3.2.1. Akustiska metoder

De akustiska geofysiska metoderna bygger på studier av variationer i elastiska vågrörelsers fortplantning och reflektion. Elastiska vågor fortplantar sig med olika hastighet i olika geologiska material. Hastigheten beror också på om materialet till exempel är vattenmättat och/eller uppsprucket. I gränsyterna mellan olika geologiska lager kan elastiska vågor reflekteras. Hur mycket energi som reflekteras respektive passerar gränsskiktet beror bland annat av kontrasten i lagrens egenskaper på ömse sidor om gränsskiktet.

Vid dynamisk belastning av mark alstras olika typer av elastiska vågor. I huvudsak talar man om kompressionsvågor (P-vågor), skjuvvågor (S-vågor) och ytvågor (R- och L-vågor). Vid mera traditionella seismiska mätningar med refraktions- och reflektionsmetoderna utnyttjas P- och S-vågor. Studier av ytvågor, särskilt R-vågor, behandlas under rubriken ytvågsseismik.

3.2.1.1. Refraktionsseismik

Refraktionsseismik bygger på registrering av utbredningshastigheten för elastiska vågrörelser i marken. Vågorna alstras vanligen med hjälp av sprängämne eller slägga och registreras med geofoner. Refraktionsmetoden kan användas för att översiktligt lokalisera dåligt packade delar i en fyllningsdamm, sprickor i omgivande berg och andra porösa och vattenfyllda svaghetszoner. Däremot är metoden inte lämplig för kontinuerlig övervakning och dess utvecklingspotential för dammundersökningar är liten.

Allmänt

Vid mera traditionella seismiska mätningar med refraktions- och reflektionsmetoderna utnyttjas kompressions- och skjuvvågor. Studier av variationer i utbredningshastigheten för kompressionsvågor i dammkroppar kan användas för att detektera och lokalisera grundvattennivåer och läckagezoner. Vattenfyllda sprickor i berggrunden under och kring en damm kan också upptäckas genom att utbredningen av P- och S-vågor jämförs. S-vågor dämpas nämligen mycket kraftigare i vattenmättat material än P-vågor.

Enligt Bogoslovsky och Ogilvy (1970) samt Hadley (1983) har refraktionsseismiska mätningar använts i ganska stor omfattning i före detta Sovjetunionen och i USA för att undersöka det tekniska tillståndet hos fyllningsdammar och för att detektera svaghets- och läckagezoner i dessa.

Metodbeskrivning

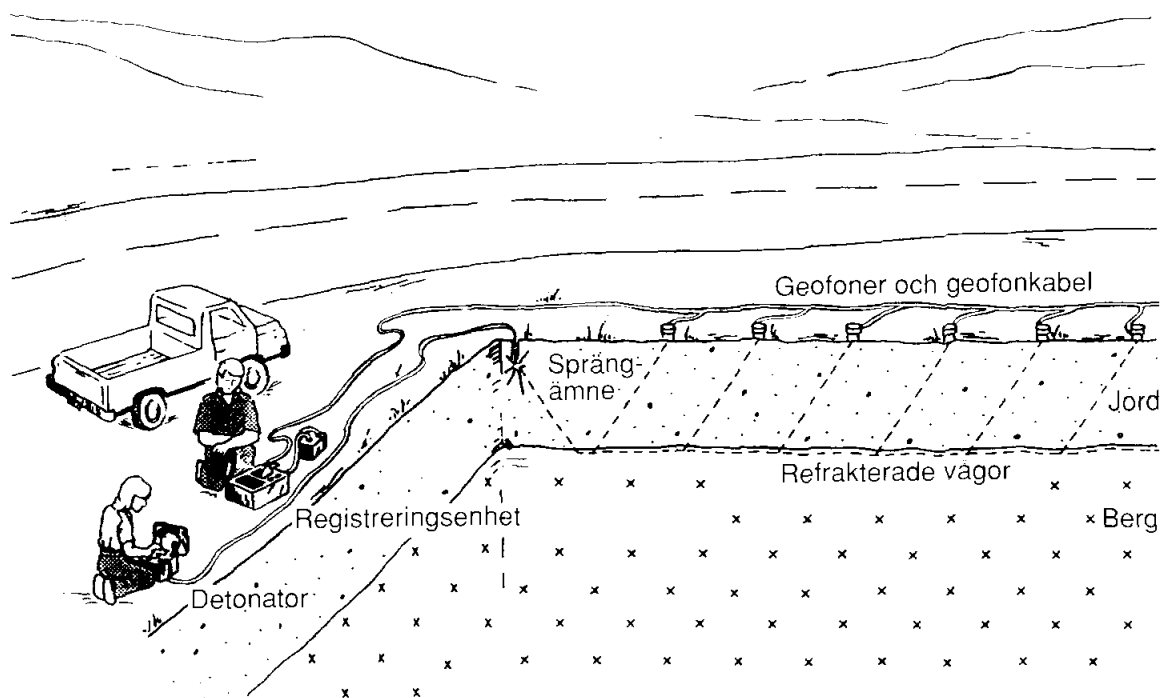
Refraktionsseismiska undersökningar bygger på att gånghastigheten i de geologiska lagren på mätplatsen ökar med djupet. I gränsskiktet mellan exempelvis de två översta lagren kommer vissa vågor att böjas av, refrakteras, och fortplanta sig med det undre lagrets högre gånghastighet. Vid markytan, på ett visst avstånd från vågkällan, kommer de refrakterade vågorna fram före de vågor som rört sig den kortare vägen längs markytan med en lägre hastighet.

Elastiska vågor alstras, vanligen med hjälp av sprängämne eller slägga och registreras vanligen med geofoner. Dessa placeras normalt i linje med jämna mellanrum och ansluts till en digital seismograf (se figur 2 nedan). Vågkällan och/eller mottagarna kan också placeras i ett eller flera borrhål. Mätningarna kan också utföras från dammens sidor eller från borrhål. Goda beskrivningar av refraktionsseismik ges bland annat av Parasnis (1979) och Sjögren (1984).

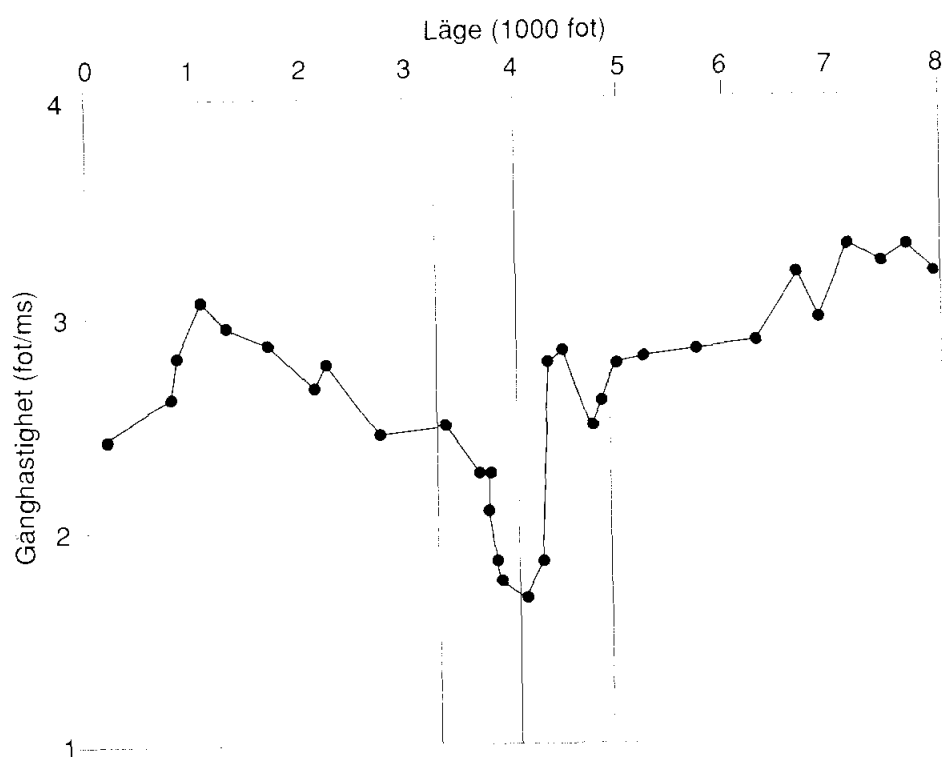
Avståndet mellan våggenerator och registreringspunkt är stort i förhållande till det djup man vill undersöka. För att få ett bra signal/brusförhållande överlagras ofta flera registreringar från samma punkt, så kallad stackning.

Utvärderingsmetodik

De registrerade rörelserna används för att upprätta gångetidsdiagram för de studerade elastiska vågorna. Gångetidsdiagrammen kan utvärderas med manuella beräkningar eller, vilket numera är vanligast, med speciella utvärderings- och tolkningsprogram. Som resultat erhålles en geofysisk-seismisk modell bestående av lager med olika vågutbredningshastighet. Hastigheterna och djupen till de olika lagren kan normalt uppskattas med en noggrannhet bättre än $\pm 10\%$ eller, vid små djup, bättre än ± 1 m. Den geofysiska modellen kan slutligen tolkas som en kvantitativ beskrivning av markens uppbyggnad under mät-



Figur 2. Principiell uppställning för refraktionsseismisk mätning. Modifierad från Robinson och Coruh (1988).



Figur 3. Resultat från refraktionsseismiska mätningar längs en fyllningsdamm i USA. I den centrala delen är gånghastigheterna mycket låga och detta har tolkats som dålig packning i denna del av dammen. Efter Hadley (1983).

platsen. För att få goda resultat fordras ofta en jämförelse/kalibrering med observationer från borrhål på mätplatsen. Ett exempel på resultat vad avser gånghastigheter från mätningar i en fyllningsdamm visas i figur 3.

Potential och begränsningar

Med refraktionsmetoden är det möjligt att översiktligt lokalisera områden med bristfällig packning i en fyllningsdamm, injekteringsresultat i berg, sprickor i omgivande berg och andra porösa och vattenfyllda svaghetszoner. Generellt gäller att vid höga dammar kan en sämre mätkvalitet förväntas eftersom noggrannheten avtar med ökande undersökningsdjup.

För att refraktionsmetoden ska vara fullt användbar krävs att de material som önskas separeras har skilda gånghastigheter och att dessa ökar med djupet. Dessutom krävs en viss minsta utbredning och tjocklek av ett lager för att det ska kunna detekteras. Metodens upplösning är normalt för otillräcklig för att med framgång påvisa punktformiga förändringar i dammar eller variationer orienterade i plan med storlek upp till någon eller några få meters tjocklek.

En annan begränsning vid refraktionsseismiska mätningar är att den utsända energin från vågkällan inte får vara så stor att dammen skadas. Explosioner med hjälp av sprängämnen är normalt olämpliga. Tryckvågorna får alstras med exempelvis slägga istället, vilket minskar djupnedträngningen och möjligheterna att få god upplösning i resultaten. Ett sätt att lösa dessa problem kan vara att placera geofonerna nära vattenbrynet på uppströmssidan av fördämningen och att detonera sprängämnen i magasinet uppströms dammen.

3.2.1.2. Reflektionsseismik

Reflektionsseismik bygger på registrering av reflektionsvågor från olika horisonter i undergrunden. Vanligen alstras de elastiska vågorna med en vibrator och registreras med geofoner. För att kunna utföra ytnära reflektionsseismiska mätningar är det viktigt att ha en energikälla som alstrar vågrörelser med lämplig frekvensfördelning och att mottagaren kan ta emot den reflekterande energin inom ett brett spektrum. Utrustning för detta ändamål utvecklas för närvarande och bedöms inom några år kunna ge en god bild av en fyllningsdamms inre struktur vid tillståndskontroll. Däremot är metodens potential för kontinuerlig övervakning liten.

Allmänt

Reflektionsseismik är den mest använda seismiska metoden i oljeprospekteringssammanhang och den bygger på registrering av den tid det tar för en utsänd våg att fortplantas ned till en gränsyta i vilken den reflekteras tillbaka till markytan. Med denna metod kommer man närmare en bild av den strukturella uppbyggnaden av marklager vid undersökningar ner till tusentals meters djup än med de flesta andra geofysiska metoder. Noggrannheten är under gynnsamma förhållanden mycket god.

Fram till de senaste åren har reflektionsseismik främst använts för undersökningar ner till stora djup, exempelvis vid olje- och gasprospektering. Nu pågår utveckling för att kunna utnyttja metoden för kartläggning av ytnära geologiska lager, det vill säga ned till något tiotal meters djup. Detta uppnås genom att generera, registrera och bearbeta högfrekventa

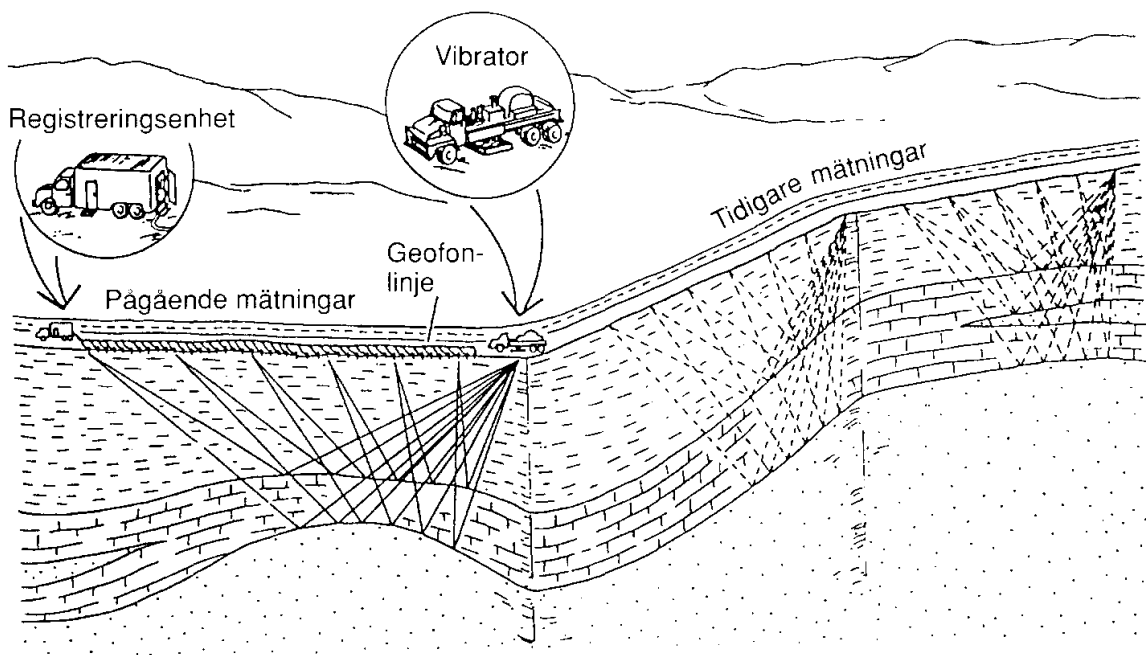
elastiska vågrörelser. Sådana mätningar i dammkroppar bör kunna vara till nytta för att bedöma tillståndet inuti en fyllningsdamm och för att detektera och lokalisera grundvattennivåer och olika strukturella förändringar i dammen.

Metodbeskrivning

Vid denna typ av seismiska undersökningar registreras inkomna reflekterade vågor från olika horisonter i undergrunden. Liksom vid refraktionsseismik kan vågrörelserna alstras med hjälp av till exempel släggslag, sprängämne eller vibrator, vilket är det vanligaste.

Reflektionerna från de olika horisonterna registreras i ett flertal punkter, vanligen med hjälp av geofoner. Dessa placeras normalt i linje med jämna mellanrum och ansluts till en digital seismograf, se figur 4 nedan. För att få en god upplösning relativt nära markytan placeras våggenerator och registreringsanordningar förhållandevis nära varandra. Även här överlagras ofta flera registreringar från samma punkt, så kallad stackning för att få ett bra signal/brusförhållande.

Reflektionernas styrka bestäms av skillnaden i akustisk impedans mellan två angränsande lager. Förhållandet mellan de akustiska impedanserna uttrycks som en reflektionskoefficient. Olika värde på reflektionskoefficienten svarar i allmänhet mot olika geologiska material men detta behöver inte vara fallet. Därför måste man kalibrera eller jämföra en registrering mot en känd lagerföljd i något borrhål, se vidare Parasnis (1979).



Figur 4. Principiell uppställning för reflektionsseismisk mätning för geologisk undersökning. Vid mera ytnära undersökningar av dammkroppar behöver inte så stor och tung utrustning som på bilden användas. Modifierad från Robinson och Coruh (1988).

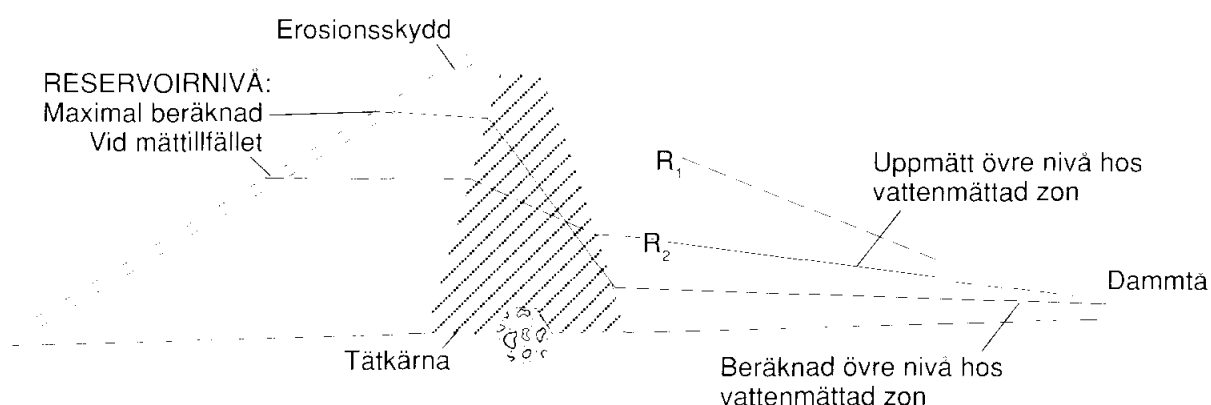
Utvärderingsmetodik

Reflektionsseismiska mätningar redovisas ofta som så kallade VAR-diagram (variable area) i vilka reflektioner efter olika gångtider markeras. Ett sådant diagram ger snabbt en uppfattning om skikt med avvikande gånghastighet och/eller densitet. Den vertikala axeln är uttryckt i gångtid och inte i djup. Med hjälp av kalibrering i ett borrhål eller genom uppskattningar av gånghastigheter kan den reflektionsseismiska strukturen djuptolkas. Ett exempel på en sådan tolkning av reflektioner inuti en fyllningsdamm visas i figur 5.

Potential och begränsningar

För att kunna utföra ytnära reflektionsseismiska mätningar är det viktigt att ha en energikälla som alstrar vågrörelser med lämplig frekvensfördelning och att mottagaren kan ta emot den reflekterade energin inom ett brett spektrum. Metoden fungerar bäst då det översta marklagret är vattenmättat och består av tätt packade sediment. Om dessa förhållanden inte råder kan ett alternativ vara att placera geofonerna nära vattenbrynet på uppströmssidan av fördämningen och att utlösa vågenergin i magasinet uppströms dammen.

Våggeneratorer och seismografer för ytnära reflektionsseismik är i skrivande stund inne i en utvecklingsfas. Reflektionsseismiska mätningar bedöms under de närmaste åren nå en sådan noggrannhet och upplösning att de kan ge en mycket god bild av en fyllningsdamms inre struktur och grundvattennivåns variationer. Metoden ger bäst resultat då det finns distinkta plana skiktgränser i en damm men kan också fungera bra vid punktformiga strukturer och förändringar. Diffusa och svaga förändringar är däremot svåra att upptäcka med reflektionsseismik.



Figur 5. Resultat av reflektionsseismiska mätningar tvärs över en fyllningsdamm i Armenien. Två seismiska gränsskikt, R_1 och R_2 , har bestämts i nedströmssidan av dammkroppen. R_1 har tolkats som gränsen mellan mindre kompakterat och mer kompakterat material. R_2 har tolkats som den vattenmättade zonens övre gräns. Denna ligger högre än den vid konstruktionen beräknade trots att dammen inte var helt fylld vid mättillfället. Detta tolkades som att dammens tätkärna hade för stor genomsläpplighet och en förstärkning av dammtän rekommenderades. Efter Bogoslovsky och Ogilvy (1970).

3.2.1.3. Ekolod

Principen för ekolod är att en ljudpuls sänds ut från en sändare, reflekteras mot olika gränssytor och detekteras därefter i en mottagare. Reflexernas ankomsttid används för att bestämma avståndet till gränssyterna. I marken består gränssyterna av densitets- eller vattenkvotskillnader. Kan problemet att överföra ljudvågorna till marken bemästras, har metoden potential för undersökning. Vid mätningar mellan borrhål kan bättre utvärderingsmetodik tillämpas. Metoden är då lämplig att användas för undersökning av dammar.

Allmänt

Ekolod eller sonar utnyttjar det fenomenet att ljudvågor reflekteras när de faller in mot en gränssyta mellan lager med olika akustisk impedans. Den akustiska impedansen beräknas som produkten av densitet och hastighet. Genom att bestämma tiden, t , för den reflekterade ljudvågen att återvända kan avståndet beräknas om hastigheten är känd. Hastigheten i sin tur beräknas som roten ur E-modulen dividerad med densiteten.

$$Z = \rho \cdot v$$

$$s = v \cdot t$$

$$v = (E/\rho)^{1/2}$$

där

$$Z = \text{akustisk impedans, (kg/m}^2\text{s)}$$

$$\rho = \text{skrymdensitet, (kg/m}^3\text{)}$$

$$v = \text{hastighet, (m/s)}$$

$$s = \text{sträcka, (m)}$$

$$t = \text{tid, (s)}$$

$$E = \text{elasticitetsmodul, (MPa)}$$

Ljudvågorna dämpas under passage av fast material. Vid reflektionsmätningar kan dämpningen inte beräknas eftersom sändare och mottagare då befinner sig intill varandra på objektets ena sida. Vid transmissionsmätningar däremot kan dämpningen beräknas eftersom sändare och mottagare då befinner sig på ömse sidor om objektet.

Upplösningen, dvs förmågan att separera intilliggande objekt, beror av den utsända energins relativa bandbredd. Denna beräknas som kvoten mellan frekvensbandet och centerfrekvensen. Om den utsända energin fördelas över frekvensbandet enligt en gaussfunktion kommer upplösningen att vara oberoende av dämpningen.

Ekolod för mätning av vattendjup är ofta monokroma, dvs de sänder korta pulser av en enda frekvens. Orsaken till det är att det är lätt att göra en effektiv monokrom sändare, då man kan utnyttja dess egenskaper vid resonans. För att göra mycket korta pulser måste man emellertid höja frekvensen, då det i allmänhet krävs 10-100 oscillationer för att sändaren skall hinna svänga ut till full effekt.

Metodbeskrivning

Ett ekolod för dammundersökning bör vara bredbandigt och datorstyrt. Datorstyrningen medför att önskad vågform kan alstras. Sändaren bör vara av en sådan typ att den kan alstra ljudvågor upp till 12 kHz. Ju lägre frekvens man vill åstadkomma desto tyngre blir sändaren. Undre gränsen för hanterbara sändare är inte skarp men torde ligga i området 2-3 kHz. Mottagaren torde i de flesta fall kunna utgöras av en standardhydrofon med förstärkare. Om

betydande lågfrekvent buller förekommer i dammen bör detta filtreras bort innan hydrofon-signalen digitaliseras.

Mätförfarande

För att erhålla god akustisk koppling mellan sändare respektive mottagare och objektet, skall mätningarna utföras under vatten. Impedansen för luft är mycket liten, varför luft inte kan användas som kopplingsmedium mellan sändare och undersökt objekt. Man kan också tänka sig att såväl sändare som mottagare placeras i magasinet uppströms dammen och att man därifrån sänder in en ljudpuls i dammkonstruktionen. Ljudpulsen får reflekteras mot tät kärnans båda begränsningsytor.

Man kan emellertid även tänka sig hybridformer i vilka sändaren pressas mekaniskt mot dammkrönet medan mottagaren hålls i vattnet uppströms dammen. Mottagaren kan sänkas ner i ett vattenfyllt rör, som slagits ner i tät kärnan. Både sändare och mottagare kan sänkas ner i rör i tät kärnan för sk cross-hole mätningar. Goda resultat från sådana mätningar (Sonic Cross-Hole) har redovisats av Bertacci (1991). Utvärderingen sker då genom tomografisk analys, jfr beskrivning av borrhålsradar på sidan 41 och följande.

Vid ekolodsmätningar från dammkrönet kan sändare och mottagare inneslutas i ett vattenfyllt ballongdäck, vilket rullas fram över dammkrönet under så stor belastning att det pressas ordentligt mot dammkrönet. Däcket får inte ha något mönster, eftersom detta skulle minska anliggningsytan och därmed ljudtransmissionen. Ännu bättre vore att ha sändare och mottagare i separata hjul.

Bestämning av ljudhastigheten kan göras genom identifiering av reflexer med känt ursprung, genom transmissionsmätningar eller genom flerkanalmätning som CDP eller WARR. Flerkanalsmätningar beskrivs utförligt i avsnittet om georadar, jfr sidan 37 och följande. Kortfattat kan sägas att metoderna baserar sig på kända geometriska förändringar mellan sändare och mottagare då ljudvågorna reflekteras mot ett lager nere i dammen. I CDP metoden har man flera sändare och mottagare i olika positioner och kopplar om mellan dem. I WARR metoden låter man avståndet mellan sändare och mottagare öka successivt.

Utvärderingsmetodik

Utvärdering av ekoloddata sker först genom att sonogram ritas ut. Dessa visar reflexernas styrka som funktion av tiden (y-axeln) och läget (x-axeln). Papperet svärtas i proportion till hur stark reflexen är. I denna typ av diagram är det oftast endast möjligt att studera reflexernas ankomsttider. Orsaken är att gråskalans dynamik är för dålig för att medge en analys av reflexernas styrka. Eftersom registrerade data är digitaliserade är det enkelt att utvärdera reflexstyrkan numeriskt. Den kan t ex ritas upp i ett diagram parallellt med sonogrammet. Styrkan med sonogrammet är att det återger ett akustiskt tvärsnitt genom konstruktionen och att det därmed är intuitivt lättförståeligt även om tolkningen kan bli omfattande och komplicerad.

Ekolodtekniken bör kunna användas för repeterade mätningar. Om sådana utförs bör man ha stort utbyte av att konstruera animerade sekvenser som visar hur dammens akustiska profil ändras under året eller mellan år med olika tillrinning. Med en sådan databas är det också med betydligt större säkerhet man kan dra slutsatsen att något börjar se onormalt ut.

Potential och begränsningar

I Italien har goda erfarenheter erhållits från ekolodsmätningar i borrhål (Sonic Cross-Hole). Mätningar har skett i sex fyllningsdammar. Metoden bedöms därför även kunna användas i Sverige för undersökning av dammar.

Mätning med ekolod från dammkrönet har såvitt känt inte utförts eftersom befintlig utrustning inte är lämplig för detta. Vid LTH pågår emellertid utveckling av ett ultrabredbandigt ekolod med datorstyrning, varför experiment kan utföras. Metodens största begränsning ligger i kopplingsproblemet: att överföra akustisk energi mellan dammkonstruktionen respektive sändare och mottagare. Det kan vara svårt att hålla överföringen så konstant att det blir meningsfullt att studera amplitudinformationen i de reflekterade signalerna. Andra begränsningar utgörs av dämpningen i torrt jordmaterial och spridningen i grova material som t ex erosionsskydd. Kopplingen till de primära parametrarna porositetsökning och läckage är sannolikt inte så stark att ekolod kan förväntas bli en frekvent metod för undersökning av fyllningsdammar. Noggrannhet och upplösning kan förväntas vara god vad avser distinkta avvikelser, medan diffusa läckage knappast kommer att registreras med ekolod.

Ekolod kan vara ett intressant komplement till georadar vid kartläggning av den strukturella uppbyggnaden av en fyllningsdamm. Ekolod indikerar skillnader i dammens densitet och ljudhastighet medan radar indikerar skillnader i elektrisk konduktivitet och radiovåghastighet.

3.2.1.4. Ytvågsseismik

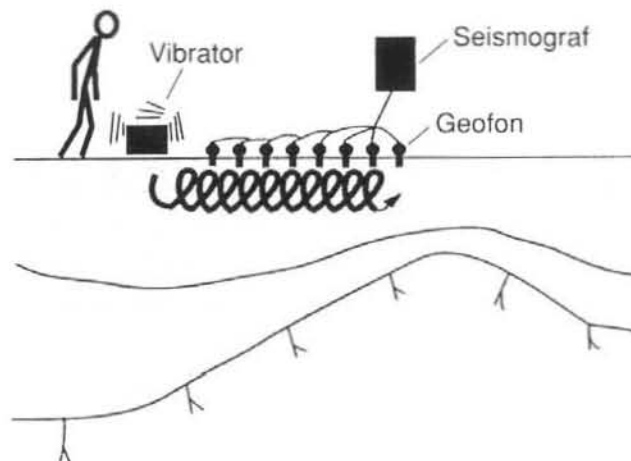
Ytvågsseismik bygger på registrering med geofoner av Rayleigh-vågor som alstras med en vibrator. Genom uppmätning av våglängden kan R-vågornas utbredning beräknas. Utbredningshastigheten är indirekt relaterad till markens fasthet och densitet. Om en vibrator utvecklas, lämplig för rutinmässiga undersökningar, bedöms ytvågsseismik vara möjlig för undersökning av dammar. Vid tillståndskontroll ger metoden bättre noggrannhet och upplösning vid diffusa förändringar av packningsgrad och densitet i en dammkropp än övriga beskrivna akustiska metoder. Däremot är ytvågsseismik inte lämplig för kontinuerlig övervakning.

Allmänt

Vid dynamisk belastning av mark fortplantas huvuddelen av den totala vågenergin i form av Rayleighvågor (R-vågor). R-vågor utbreder sig utmed markytan, och ca 80% av energin finns koncentrerad inom ett djup motsvarande ungefär halva våglängden. Utbredningshastigheten, v_R , beror av markens egenskaper ned till en halv våglängds djup. Genom att utföra mätningar med olika våglängd erhålls information om jordens egenskaper inom ett varierande djupintervall.

Metodbeskrivning

R-vågor alstras lämpligen med en vibrator, vilken placeras så att god kontakt med marken uppnås. Källfrekvensen, f , bör vara kontinuerligt reglerbar så att våglängden, λ , och därmed även inträngningsdjupet kan varieras godtyckligt. Som mottagare används geofoner, vilka placeras i linje med jämna mellanrum och ansluts till en digital seismograf, se figur 6.



Figur 6. Mätupställning för R-vågsseismiska mätningar, efter Triumf (1992).

Genom uppmätning av våglängden, λ , vid olika källfrekvens, f , kan variationen med djupet av R-vågornas utbredningshastighet beräknas enligt formeln $v_R = f \cdot \lambda$. Utbredningshastigheten är indirekt relaterad till markens genomsnittliga dynamiska skjuvmodul, G_{dyn} , som kan relateras till jordens fasthet. Approximativa empiriska samband råder dessutom mellan jordens densitet, ρ , och R-vågornas utbredningshastighet samt mellan den dynamiska skjuvmodulen och pressometermodulen, E_p .

Generellt gäller att penetrationen minskar med ökande frekvens (kortare våglängd) och vice versa. Vid höga frekvenser bestäms således de genomsnittliga jordparametrarna inom ett yttligare mätintervall än vid låga frekvenser.

Potential och begränsningar

Ytvågsseismik används idag för mätning av packningsgrad i fyllning samt för bestämning av markens densitet och dess elastiska egenskaper. I en fyllningsdamm kan resultaten, speciellt för mätningar på lite större djup, bli svårtolkade om dammens geometri påverkar vågornas utbredning.

Ytvågsseismiken befinner sig fortfarande på utvecklingsstadiet. Det finns ett behov av att ta fram vibratorer, lämpliga för rutinmässiga undersökningar. Metoden bedöms kunna ge bättre noggrannhet och upplösning vid diffusa förändringar av packningsgrad och densitet i en dammkropp än övriga beskrivna akustiska metoder.

3.2.1.5. Läckljudsmätning / akustisk emission

Principen för **läckljudsmätning** är att snabbt strömmande vatten ger ett mätbart brus. Med flera mikrofoner kan brusets ursprung bestämmas. Bakgrundsnivån är avgörande för om signalerna kan detekteras. Metoden har störst potential för övervakning, då den kräver fasta installationer.

Principen för **akustisk emission** är att när en omlagring av krafter sker i jorden sänds ljud ut. Med flera mikrofoner kan ljudkällans läge bestämmas. Bakgrundsnivån är avgörande för om signalerna kan detekteras. Även denna metod kräver fasta installationer och har därför störst potential för övervakning.

Allmänt

När vatten strömmar i ett poröst material uppstår ljud, vars intensitet och frekvens är proportionell mot strömningshastigheten. Omlagring av spänningar i en jordvolym ger upphov till akustiska emissioner. Dessa ljud kan detekteras och lokaliseras.

Metodbeskrivning

Avlyssning av en fyllningsdamm kan ske med accelerometrar eller hydrofoner. Signalerna från dessa leds till en dator i vilken lagring och bearbetning sker.

Vid akustisk emission (knäppljudsmätning) måste utrustningen vara i kontinuerlig drift och man kan t ex inte låta datorn utföra datareduktion 10 minuter varje timme. Rimligaste tillvägagångssättet är att man har hårdvara som detekterar att något inträffat och därefter reducerar data så att man inte behöver lagra signaldata kontinuerligt i datorn. Det finns oscilloskop som kan triggas innan en händelse inträffat, genom kontinuerlig digitalisering av data. När ett triggningsvillkor är uppfyllt stoppas datatagningen så att det i minnet finns kvar data från epokerna före och efter tidpunkten då triggningsvillkoret uppfylldes. Läckljudsmätningar kan däremot ske intermittent eftersom läckaget pågår kontinuerligt.

Mätförfarande

Akustisk emission studeras med fast monterade sensorer. Har man fyra sådana kan man beräkna var emissionen har sin källa. För att täcka in hela dammkonstruktionen behövs ytterligare sensorer. Eventuellt kan man placera hydrofonerna under vatten, på magasinets botten.

För läckljudsmätning är det lämpligt att vid byggnadstillfället installera ett rör längs dammkonstruktionen i tåtkärnans nedre del. Genom detta kan man sedan dra en hydrofon och mäta upp akustiska profiler. Läckaget lokaliseras genom att läckljudsintensiteten är högst under läckpunkten. Har man endast en hydrofon kan man inte bestämma avståndet till läckpunkten. För befintliga dammar får man tänka sig att montera hydrofoner i vertikala sprit- eller glykolfyllda rör. Lokalisering av läckljud kan då ske genom att man jämför intensiteten i två, på ömse sidor om läckan, placerade rör.

Utvärderingsmetodik

Akustisk emission utvärderas med hjälp av triangulering. När något inträffat registreras det i en dator med koordinater och intensitet. Efter hand fylls data på i databasen så att man kan se i vilka regioner ljudaktiviteten är störst. Vid förändrade mönster kan man låta datorn meddela detta till en driftcentral.

Eftersom metoden är stationär eller semi-stationär (rörlig hydrofon) lämpar den sig utmärkt för repeterade mätningar. Därmed medges en strategi med intensifierad bevakning inom ett begränsat område av dammen, när något mätvärde konstaterats ligga utanför den naturliga parametervariationen.

Kontinuerliga läckljudsmätningar (horisontellt rör) utvärderas med hjälp av intensitetskurvor och frekvensspektrum. Om man låter x-axeln ange positionen längs dammen kan man låta ett frekvensspektrum modulera svärtningsintensiteten i y-led. Därigenom fås bilddata, vilka liksom ekolod- och georadardata kan animeras för att visualisera normala och avvikande företeelser i dammkroppen. Det går naturligtvis även att beräkna differensbilder för att framhäva områden där förändringar skett.

Läckljudmätningar i vertikala rör kan användas för bestämning av läget i längd och höjd om man har två hydrofoner i varje rör. Eftersom ljudflödet är kontinuerligt måste bestämningen ske med korrelationsteknik. När detta väl är gjort kan man redovisa sina data på samma sätt som kontinuerliga läckljudsmätningar.

Potential och begränsningar

Läckljud är främst kopplat till läckvattnets strömningshastighet eftersom strömmande vatten ger upphov till ett mätbart brus. Med flera mikrofoner kan brusets ursprung bestämmas. Bakgrundsnivån är avgörande huruvida signalerna kan detekteras. Metoden har störst potential för övervakning, eftersom den kräver fasta installationer.

Akustisk emission kan ske när porositetökning nått en sådan omfattning att det sker en omlagring inne i dammkroppen. Metoden kan slå fel om den akustiska miljön inne i dammbyggnaden stör mätningarna. Lågfrekvent buller kan filtreras bort och därmed kan mer högfrekventa, svaga signaler från vattenströmning studeras. Akustisk emission, som kan väntas ske i hela frekvensområdet, är besvärlig att hantera, eftersom filtrering inte är lämplig. Inför en eventuell installation bör först den akustiska miljön inne i en dammkroppen undersökas. Man får anta att en kraftstation i dammens närhet är en ljudkälla som dränker all akustisk emission, men möjligen medger läckljudsmätning efter lämplig filtrering av bakgrundsbrus. Med flera mikrofoner kan ljudkällans läge bestämmas. Bakgrundsnivån är avgörande för om signalerna kan detekteras. Även denna metod kräver fasta installationer och har därför störst potential för övervakning.

Noggrannhet och upplösning är relativt liten utom då punktformiga förändringar lokalt medför kraftigt ökat läckvattenflöde och/eller omlagringar i en fyllningsdamm.

3.2.2. Elektriska metoder

Elektriska metoder bygger på galvanisk mätning av elektriska potentialer vid likström eller mycket lågfrekvent växelström. Med mycket låg frekvens menas här upp till maximalt 10 à 20 Hz, men vanligen en eller ett par hertz eller mindre.

Man kan dela in geofysiska metoder i passiva och aktiva metoder. Självpotentialmetoden (SP) är en passiv metod då man mäter naturligt alstrade potentialer. Resistivitetsmetoden och inducerad polarisation (IP) är aktiva metoder eftersom man mäter de elektriska potentialerna som uppkommer då man sänder en ström genom marken.

Elektriska metoder kan störas av ledande material som placerats i dammen exempelvis stålrör för porttrycksmätningar. Dessutom krävs galvanisk kontakt med marken, vilket i vissa fall kan vålla problem och vara tidsödande. Till fördelarna hör att det finns en direkt eller indirekt koppling mellan flöde och vattenkvot och de elektriska fälten. Vidare bedöms metoderna vara väl lämpade för kontinuerlig övervakning med hjälp av permanent installerade elektroder.

Det finns en rik flora av litteratur som beskriver elektriska metoder i allmänhet, varav några nämns i anslutning till varje tillämpning. Beträffande dammläckage ger Butler och Llopis (1990) en sammanfattning av metodik och metoder med inriktning på geofysiska metoder i allmänhet och elektriska i synnerhet.

3.2.2.1. *Självpotential (SP)*

SP-metoden bygger på galvanisk mätning av existerande elektriska potentialer, med hjälp av två elektroder som flyttas runt i undersökningsområdet. Eftersom zoner med förhöjd vattengenomströmning, i exempelvis en damm, kommer att ge upphov till elektriska avvikelser, kan dessa zoner detekteras. Genom den direkta kopplingen till vattenströmning, har metoden stor potential, såväl för tillståndskontroll med handburen utrustning som för övervakning med fast installerade elektroder.

Allmänt

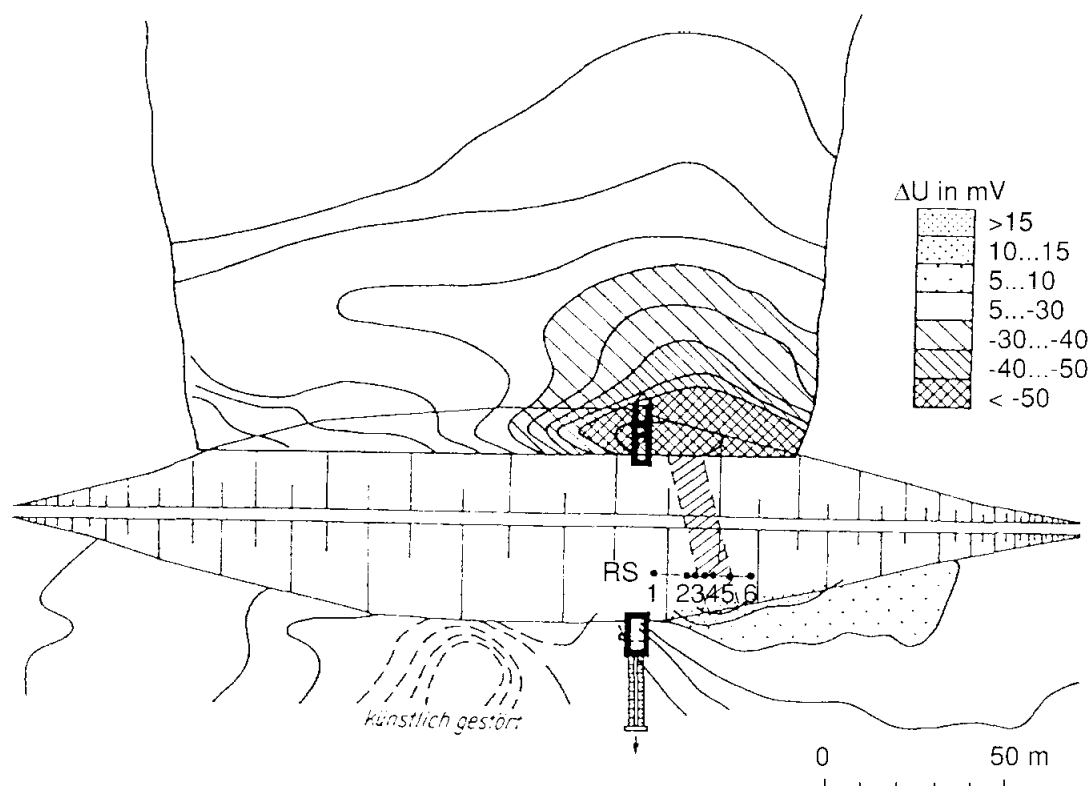
Självpotentialmetoden (SP) kan användas för detektering av flöden av vätska, värme och joner i marken, eftersom sådana flöden ger upphov till förändringar i de elektriska potentialerna i marken. Metoden utvecklades först för mineralprospektering, liksom i princip alla andra elektriska och elektromagnetiska metoder, men har på senare år börjat användas för kartering av flöde från exempelvis läckande dammar i utlandet (USA, Frankrike, Sovjet med flera länder). Ett stort antal artiklar och rapporter redovisar positiva resultat med metoden för kartering av zoner med ökat grundvattenflöde, t ex Butler och Llopis (1990), Black och Corwin (1984), Markiewicz och Randall (1984), Williams (1986), Gex (1980), Shiavone och Quarto (1984), Armbuster och Merkler (1982), Militzer et.al. (1978), Bogoslovsky och Ogilvy (1970), Ogilvy et.al. (1969), Bogoslovsky et.al. (1979) och Rao (1953). En sammanfattande beskrivning av metoden och tillämpningar ges av Corwin (1990), vilken delvis legat till grund för denna framställning.

Metodbeskrivning

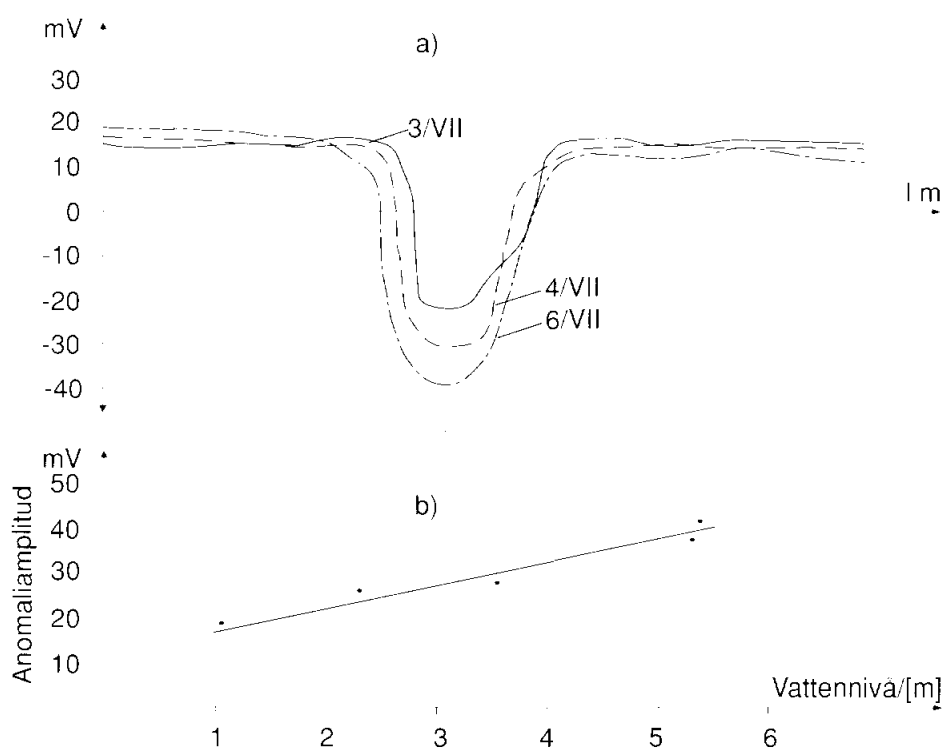
Principen för SP undersökningar är enkel: man mäter spänningen mellan två elektroder med hjälp av en voltmeter. För att uppnå god datakvalitet bör man dock använda så kallade icke-polariserbara elektroder, vilka består av en metallektrod nedsänkt i en behållare fylld med en lösning av salt av metallen (t ex koppar-kopparsulfat, bly-blykorid). Dessa är trots namnet inte helt fria från polarisation. Som mätinstrument kan man normalt använda en digital multimeter av god kvalitet.

Det finns många möjliga elektrodkonfigurationer, men det vanligaste är gradienttekniken (även kallad 'leapfrog technique', alltså ungefär grodhoppstekniken) och totalfältstekniken. Gradienttekniken innebär att man har två elektroder med ett fixerat inbördes avstånd, en kabel med en längd som motsvarar elektrodavståndet samt en voltmeter. Vid flyttning framåt längs mätlinjen hamnar den bakre elektroden i samma position som den främre elektroden lämnar. Totalfältstekniken innebär att man har en fast baselektrod, och endast flyttar den andra elektroden. Praktiskt sker detta genom att man flyttar med en kabeltrumma tillsammans med elektroden och voltmeter. Valet av mätkonfiguration är viktig för signal/brusförhållandet, och ur denna synpunkt är totalfältsmätningar normalt att föredra. Det är vidare möjligt att mäta SP-variationer i vattnet utgående från vattenmagasinet, vilket möjliggör kontinuerlig mätning genom att de elektriska kontaktproblemen reduceras.

Det finns många källor till brus som kan störa resultaten från SP-mätningar, och göra dem svårtolkade eller leda till feltokningar. Exempelvis förekommer naturliga variationer i potentialnivåerna till följd av telluriska strömmar. Man kan kompensera för dessa om man registrerar variationerna mellan fasta elektroder samtidigt som mätningen pågår. Olika metallobjekt i marken kan ge utslag, och det kan vara till stor hjälp för tolkningen om dessa detekterats med hjälp av elektromagnetiska eller magnetiska mätningar. Vidare kan elektrod-polarisation ge upphov till svårbemästrat brus, varför valet av elektroder är



Figur 7. Presentation av SP-data i form av ekvipotentialkarta. Kartan visar negativa värden där flödet tränger in i dammen/marken på uppströmssidan, och positiva värden på nedströmssidan (från Militzer et al, 1978).



Figur 8. Exempel på hur SP-utslagen kan variera beroende på vattennivå, och därmed flödets storlek, a) SP-profil före (heldragen linje), under (streckad linje) och efter nederbörd (streck-prickad linje), b) anomalins amplitud som funktion av vattennivån (från Bogoslovsky och Ogilvy, 1970).

avgörande för mätkvaliteten. Även temperaturförändringar och fukthalt i marken vid elektroderna påverkar resultatet.

Utvärderingsmetodik

Tolkning av resultaten sker ofta kvalitativt genom att resultaten ritas upp i diagram och ekvipotentialkartor, som visas i exemplet i figur 7. Normalt får man negativa anomalier, dvs avvikelser, i områden där ett läckflöde tränger in i t ex en dammkonstruktion och positiva anomalier över områden med flöde som närmar sig markytan på nedströmssidan. Det finns ett samband mellan grundvattenflödets storlek och SP-anomaliens storlek, jfr figur 8, varför en ökning av SP-anomaliens storlek i tiden kan indikera ökande läckage. Analytisk tvådimensionell modellering av SP-data genererat av vatten- och/eller värmefflöde har beskrivits av Sill (1983), vilket troligen är det intressantaste alternativet för kvantitativ tolkning.

Potential och begränsningar

SP-metoden är en av de geofysiska metoder som bedöms ha störst potential för detektering av läckage i dammar, genom den direkta kopplingen mellan vattenflöde i marken och elektriska potentialer. Man kan förvänta sig en relativt god upplösning av en läckande zons läge i planet med metoden, men dålig eller ingen upplösning av zonens djupfördelning om mätelektroderna placeras enbart på ytan. Till exempel skulle en bred anomali kunna vara orsakad antingen av en utbredd diffus flödeszon eller en djupt liggande zon. Eftersom metoden är mera känslig för förändringar av flöden än små variationer i material-sammansättning kan resultaten förväntas vara kopplade till flödets storlek och hastighet, men ej till förändringar i exempelvis porositeten. Genom kopplingen till flöde kan man också förvänta sig att SP-metoden ger utslag för såväl koncentrerade som mera diffusa flöden.

Metoden bedöms kunna användas både för allmän tillståndskontroll och för uppföljning av indikationer från andra metoder. Om man misstänker en förändring i ett parti av en damm kan man där utföra en mera detaljerad mätning. Metoden har också goda förutsättningar för automatisk kontinuerlig övervakning genom installation av fasta elektroder. För detta krävs en viss anpassning av befintlig utrustning och metodik, där frågor som kan behöva speciell uppmärksamhet för denna tillämpning är långtidsstabilitet hos elektroderna samt skydd av systemet mot åsknedslag.

Det har inte gått att finna några enkla samband för uppskattning av känslighet för förändringar i flöden i förhållande till brusnivåer, och det vore här befogat med en kombination av analytisk modellering och praktiska försök. Vid kontinuerlig övervakning med fasta elektroder är förutsättningarna goda för att upptäcka små förändringar gentemot tidigare resultat. Vid tolkning av SP-resultat är det en fördel att ha tillgång till resultat från andra metoder, exempelvis resistivitet, vilket för övrigt gäller alla geofysiska metoder.

3.2.2.2. Resistivitet

Resistivitetsmetoden bygger på galvanisk mätning av markens resistivitet eller specifika motstånd, vilket sker genom att sända en ström genom två elektroder och mäta uppkomna potentialer mellan två andra elektroder. Resistiviteten beror i huvudsak av vatteninnehållet i marken. En zon med förhöjt läckage kan på så vis registreras genom det ökade vatteninnehållet. Metoden har stor potential för både tillståndskontroll och övervakning, det senare med hjälp av fast installerade elektroder.

Allmänt

Vissa malmmineral har metallisk ledningsförmåga, annars är de vanligt förekommande jord- och bergartsbildande mineralen i praktiken isolatorer. Resistiviteten hos vanliga jord- och bergmaterial beror därför av vatteninnehållet: mängden vatten, joninnehållet i vattnet samt hur vattnet är fördelat i materialet. Viktiga tillämpningar för metoden finns inom grundvattenprospektering, grundvattenkvalitetsundersökning, och kartering av jord- och bergarters utbredning för råvarukartläggning och geotekniska ändamål. Metoden beskrivs i litteraturen av t ex Kunetz (1966), Skov- og Naturstyrelsen (1987) och Ward (1990), som till vissa delar legat till grund för följande beskrivning. Goda erfarenheter från mätningar på fyllningsdammar har redovisats av bl a Butler och Llopis (1990), Armbruster och Merkle (1982), och Militzer et al (1978).

Eventuellt lerinnehåll ger stor påverkan på resistiviteten, och lerhaltiga och organiska jordar har normalt låga resistivitet. För lerfritt material, egentligen lerfritt sedimentärt berg, ger Archies lag ett enkelt samband mellan resistivitet och porositet:

$$\rho' = \rho^v \cdot a \cdot n^m$$

där

ρ' = formationens resistivitet

ρ^v = vattnets resistivitet

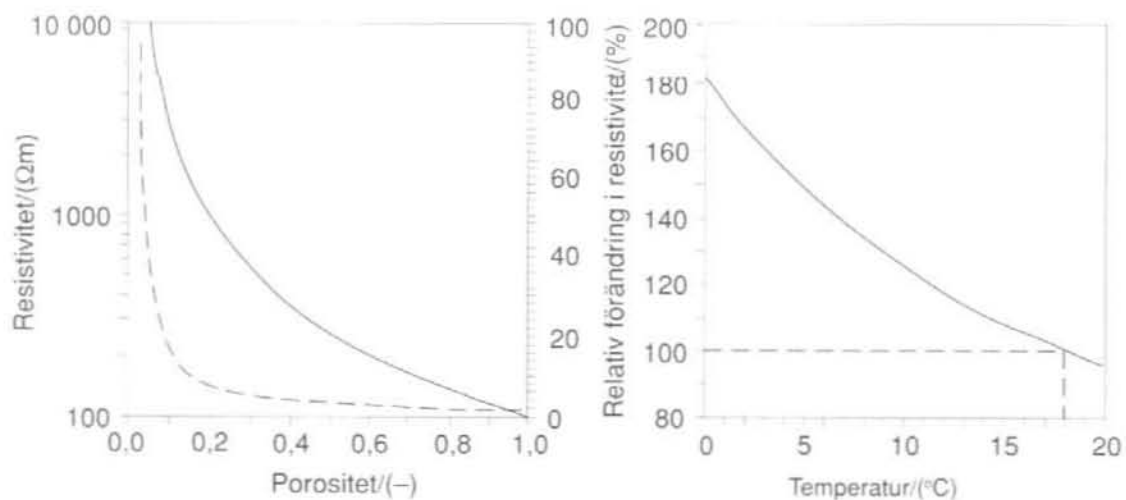
n = porositet

Parametrarna a och m är materialberoende konstanter. Jordmaterial kan jämföras med ocementerat berg, exempelvis sedimentärt berg där mineralkornen ej kittats samman genom naturliga processer. För ocementerat berg är parametern $m = 1,4$ varför detta värde kan användas för att uppskatta resistiviteten för ett lerfritt jordmaterial. Diagrammet i figur 9a visar hur resistiviteten varierar med porositeten enligt Archies lag, samt hur stor förändring i resistivitet en procents förändring av porositeten ger upphov till vid olika porositeter. Vid 20% porositet ger en höjning eller sänkning av porositeten med en procentenhet upphov till en resistivitetsförändring på cirka 6%. Effekten ökar kraftigt med sjunkande porositet, och vid 10% porositet blir motsvarande resistivitetsförändring 14%.

Resistiviteten är vidare beroende av temperaturen, se figur 9b. Resistiviteten ökar med sjunkande temperatur beroende på minskad mobilitet hos jonerna i vattnet då viskositeten ökar, och vid tjäle ökar resistiviteten kraftigt. Ofta behöver man ej ta hänsyn till temperaturvariationer vid resistivitetsundersökningar. I fallet med fyllningsdammar är dock den säsongsmässiga variationen i temperatur i dammen så stor att det ej kan försummas utan vidare: en årsmedeltemperatur kring 10°C och en temperaturvariation i materialet i dammen på $\pm 4^\circ\text{C}$ skulle ge en variation i resistiviteten på $\pm 12\%$. I de inre delarna av en damm som uppfyller Vattenfalls anvisningar är dock temperaturvariationerna någon eller några få grader, enligt beräkningar och mätningar redovisade av Johansson (1990). I en damm med förhöjd vattenströmning kan däremot temperaturerna variera med mer än $\pm 5^\circ\text{C}$, vilket medför att zoner med stora temperaturvariationer skulle kunna registreras med kontinuerliga resistivitetsmätningar.

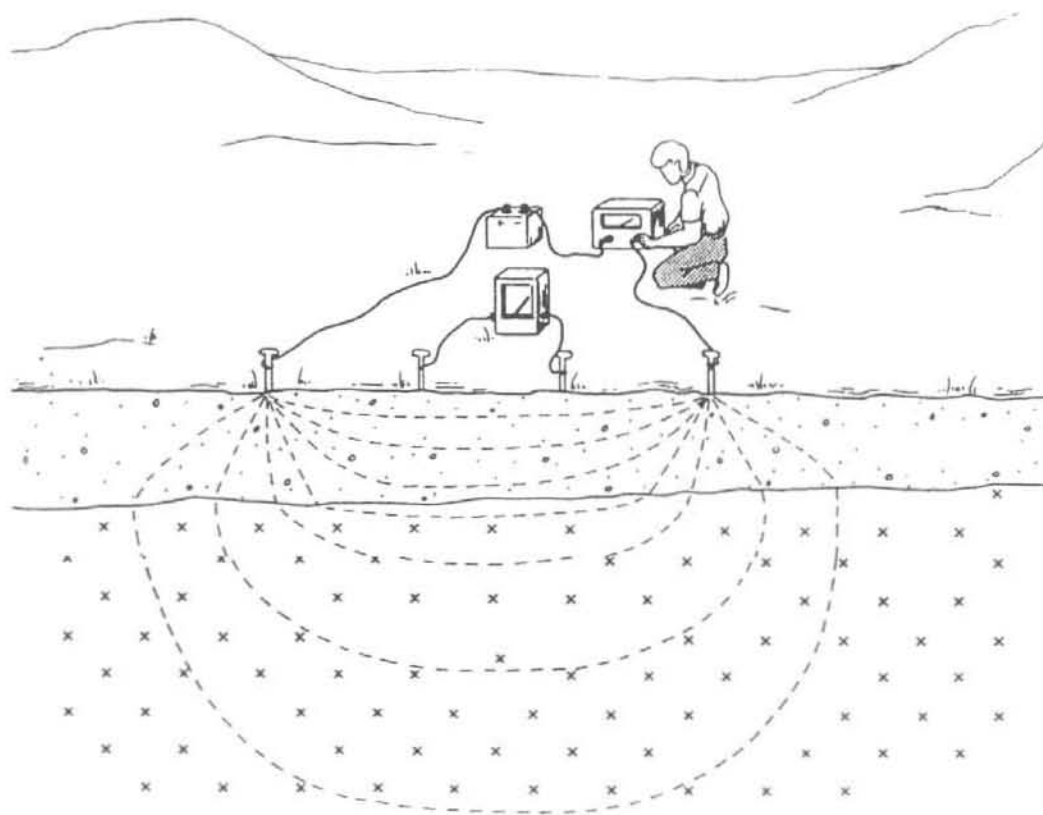
Metodbeskrivning

Mätningarna utförs genom att en kontrollerad ström sänds mellan två elektroder som stucks ned i marken, samtidigt som potentialfallet mäts mellan två andra elektroder, se figur 10. Ofta används elektroder av rostfritt stål för såväl ström- som potentialelektroder. Normalt används en fyrkantvåg med omväxlande polaritet för mätningarna. Genom att



Figur 9. a) — Resistivitetens beroende av porositeten i lerfritt och vattenfyllt material enligt Archies lag. ($\rho_v = 100 \Omega m$, $a = 1,0$, $m = 1,4$)
 --- Relativ förändring av resistiviteten vid en procentenhets förändring av porositeten.

b) Resistivitetens beroende av temperaturen enligt
 $\rho(T) = \rho(T=18^{\circ}C) / (1 + 0,025(T - 18))$



Figur 10. Princip för elektrisk resistivitetmätning (modifierad från Robinson och Coruh, 1988).

beräkna medelvärde av mätningar med omvänd polaritet minimerar man störningar från självpotentialer. Mätningen ger ett mått på resistansen $R = U/I$ (Ohms lag), med enheten ohm (Ω). U betecknar här spänning och I strömstyrka. Moderna mätinstrument innehåller normalt strömkälla, amperemeter och voltmeter, samt en mikroprocessor som styr mätningarna och presenterar mätvärdena som resistanser. Vidare finns det normalt möjlighet att lagra mätvärden i en inbyggd datalogger eller skicka dem digitalt till ett yttre lagringsmedium.

För att resultatet skall kunna tolkas måste de uppmätta resistanserna räknas om till materialparametern resistivitet (ρ), med enheten ohm-meter (Ωm), vilken är oberoende av provvolymens storlek. Resistiviteten beräknas med hjälp av en formel, som tar hänsyn till hur elektroderna placeras geometriskt. Det beräknade värdet benämns skenbar resistivitet (ρ_a), beroende på att resultatet avspeglar den kombinerade effekten av alla ingående enheter inom de aktuella markvolymen. Genom att variera elektrodavstånden kan djupnedträngningen varieras.

Elektroderna kan placeras ut enligt många olika principer. Det är vanligt att elektroderna placeras på en linje med strömelektroderna ytterst, och potentialelektroderna symmetriskt placerade kring mittpunkten, som i figur 10. Två välkända metoder för detta har uppkallats efter Wenner respektive Schlumberger. Dock kan det tänkas att andra elektrodkonfigurationer är mera lämpade för dammundersökningar, t ex dipol-dipol eller pol-pol.

Resistivitetsundersökningar utförs oftast på följande tre olika sätt: profilering, sondering eller kombinerad profilering-sondering. Det senare kallas även CVES (Continuous Vertical Electrical Sounding). Vid profilering förflyttar man en konfiguration längs en linje utan att ändra de inbördes elektrodavstånden, vilket ger en uppfattning om resistivitetsvariation längs linjen men ej variationen mot djupet. Resistivitetssondering, eller VES (Vertical Electrical Sounding), innebär att man successivt ökar elektrodavstånden kring en mittpunkt. Eftersom djupnedträngningen ökar med ökande elektrodavstånd avspeglar mätningarna resistivitetsvariation mot djupet. Om mätningarna utförs manuellt innebär det att en eller flera elektroder måste flyttas för varje nytt mätvärde, vilket blir tids- och personalkrävande. Med hjälp av moderna datorstyrda mätsystem kan en eller ett par personer göra båda typerna av mätning samtidigt, dvs CVES, vilket torde vara den teknik som är mest intressant för dammundersökningar. Vid mätning med datorstyrt mätsystem placerar man ut ett större antal elektroder, exempelvis ett 50-tal, vid mätningens början varpå datorn sköter omkoppling mellan de olika elektrodpositionerna. Datorstyrd mätning kan göras helt automatiskt om man har ett system av fast installerade elektroder.

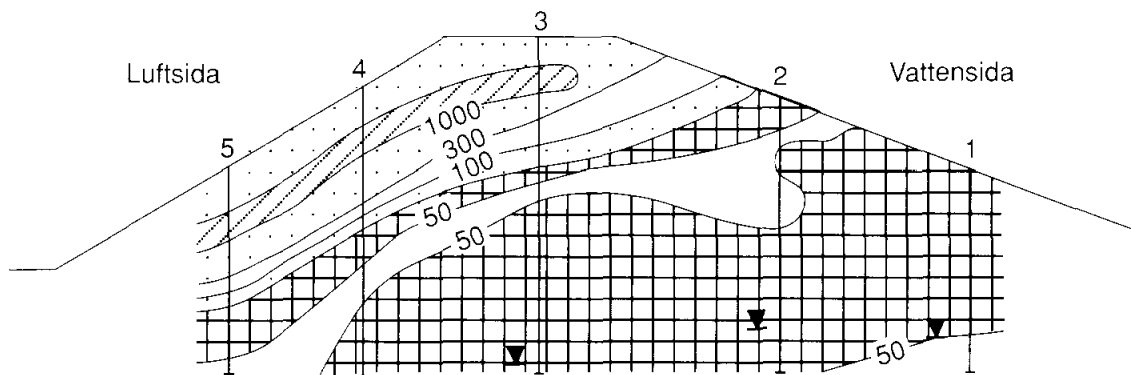
Den geometriska upplösningen hos metoden är beroende av hur många olika elektrodavstånd man mäter med, och hur tätt det är mellan mätpunkterna längs en profil. Vidare är upplösningen störst nära markytan och avtar med djupet, på grund av den ökade jordvolymen som inkluderas i mätningen. Möjligheten att signifikant urskilja en förändring i resistiviteten är naturligtvis kopplad till datakvaliteten, vilken med moderna instrument främst är beroende av hur god elektrodkontakt man kan etablera, förutsatt att det inte förekommer kraftiga elektriska störfält. Data redovisade av Dahlin (1989) visar att medelmätfelet med ett standardinstrument vid god elektrodkontakt normalt ligger under 1 %. Det kan dock bli betydande mätfel om den galvaniska kontakten med marken är otillräcklig.

Resistivetsmätningar kan även användas för tomografi, där data samlas in i två eller tre dimensioner genom en kombination av elektroder längs ytan och i borrhål. I fallet undersökning av fyllningsdammar skulle man kunna tänka sig att elektroder placeras på såväl uppströms som nedströmssidan om dammen. Genom att även mäta i borrhål får man större möjlighet till god detaljupplösning på djupet.

Utvärderingsmetodik

Tolkning av resistivetsdata kan ske kvalitativt genom att data ritas upp i diagram eller pseudosektioner. På så vis kan man identifiera zoner med avvikande resistivitetsegenskaper, vilket kan indikera områden som behöver följas upp med andra metoder. Kvantitativ tolkning av VES-data sker normalt genom att en lagermodell anpassas till uppmätta data för att man skall få en uppfattning om hur resistiviteten varierar mot djupet, man antar alltså en endimensionell tolkningmodell (1D-tolkning). Figur 11 visar ett exempel på presentation av sådan. Motsvarande tolkning för CVES kan göras som en upprepad 1D-tolkning.. Mera korrekt är en tolkning som tar hänsyn till tvådimensionella variationer (2D-tolkning), och rutiner för detta är under utveckling på flera håll i världen bland annat vid LTH. Kvantitativ tolkning av tomografiska mätningar kan ske i 2D eller 3D, och forskning pågår även för att utveckla rutiner för detta.

Förändringar av resistiviteten i tiden i fyllningsdammar torde kunna hänföras främst till förändringar i vattennivå, porositet, temperatur samt konduktivitetsvariationer i magasinets vatten. Genom analys av tidsserier av data bör det vara möjligt att särskilja förändringar i porositet från temperatur- och vattennivåförändringar.



Figur 11. Exempel på presentation av resistivitetssonderingar i en damm. Den lågresistiva zonen ($\rho < 50 \Omega m$) skulle kunna vara en zon med förhöjd vattenkvot och ökat läckflöde (modifierad från Militzer et.al, 1978).

Potential och begränsningar

Resistivetsmätning är en metod som är intressant för undersökning av fyllningsdammar, eftersom resistiviteten beror av jordmaterialets vattenkvot och därmed skulle kunna ge indikation på förändringar av porositeten. Man kan genom mätningar med elektroder placerade på ytan få en uppfattning om variationerna i elektriska egenskaper i planet och mot djupet, dvs man kan samla in och tolka data i såväl två som tre dimensioner, där dock förmågan att detektera mindre zoner avtar mot djupet. Utbredda diffusa och horisontella zoner bör kunna identifieras ganska väl, medan små koncentrerade zoner på djupet är

svårare att lokalisera. En bättre upplösning mot djupet kan uppnås om elektroder även placeras i borrhål.

Metoden bedöms kunna användas för såväl allmän tillståndskontroll som uppföljningar av indikationer från andra metoder, där man i det senare fallet kan tänka sig en mera detaljerad mätuppläggning i ett parti av en damm där man misstänker en förändring. Metoden har vidare goda förutsättningar för automatiserad övervakning med hjälp av permanent installerade elektroder och kablar, och ett sådant system skulle kunna integreras med ett system för SP-mätning. Även här kan det krävas viss anpassning och kalibrering av utrustning och metodik.

Genom kontinuerlig övervakning med fasta elektroder kan de naturliga säsongsvariationerna identifieras, och mindre förändringar av resultaten i tiden bli signifikanta. Exempelvis kan man i en normal fyllningsdamm anta ett jämnt fördelat vattenflöde genom dammen, och därmed små och jämnt fördelade temperaturförändringar i dammen. Om inre erosion pågår i något parti av dammen leder detta till att den hydrauliska konduktiviteten ökar, vilket ökar vattengenomströmningen lokalt. Genom den ökade porositeten minskar resistiviteten i det skadade partiet i förhållande till det omgivande intakta materialet, samtidigt som den ökade vattengenomströmningen gör att temperaturvariationerna ökar. En lokal temperatur som understiger omgivningens minskar resistivitetskontrasten, medan en högre temperatur ökar resistivitetskontrasten. Således kan man förvänta sig en större säsongsvariation av resistiviteten i ett skadat parti.

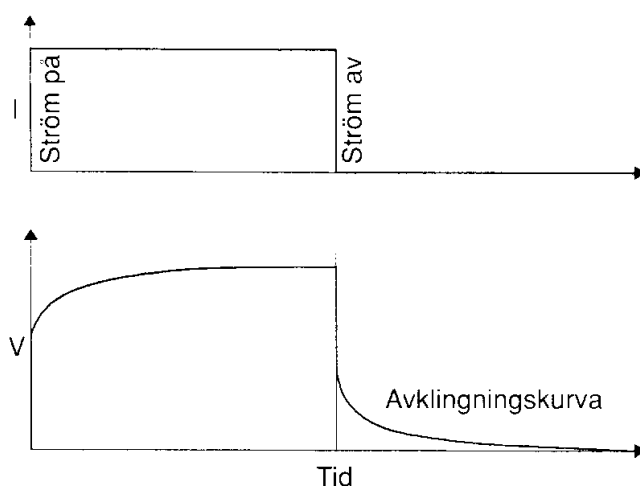
3.2.2.3. *Inducerad polarisation (IP)*

IP-metoden bygger på galvanisk mätning av resistivitets frekvensberoende och är således en utvidgning av resistivitetsmetoden. IP-effekterna kan förklaras med elektrokemiska fenomen i marken. Metoden bedöms ha liten potential för dammtillämpningar.

Allmänt

Hittills har det förutsatts att Ohms lag gäller fullt ut för ledning av ström genom jorden. Emellertid går det en viss tid efter strömmen kopplats på innan spänningen vuxit till ett stationärt värde, liksom spänningen ej försvinner ögonblickligen efter strömmen slagits från, som visas i figur 12. Detta beror på att marken fungerar ungefär som en kondensator som laddas upp när strömmen sluts, och som laddas ur när strömmen bryts. Detta kallas IP-effekt där IP står för inducerad polarisation. Vid resistivitetsmätning undviker man IP-effekten genom att vänta med att mäta potentialen tills den stabiliserat sig, där det normalt räcker med bråkdelen av en sekund. IP-mätning kan sägas vara en variant av resistivitetsmätning där även frekvensberoende information mäts.

Förutom vid malmprospektering, olika malmmineral kan ge upphov till kraftiga IP-effekter, har metoden använts för kartering i samband med grundvatten och föroreningar i mark. Lerhalt i marken kan ge upphov till IP-effekter, vilket gör metoden intressant för att skilja mellan lågresistiva enheter med och utan lera vilket är av avgörande betydelse för dess grundvattenhydrauliska egenskaper. Förorening av mark och grundvatten kan ge en förändring av IP-effekterna, vilket gör att metoden använts vid kartering av föroreningar. IP-metoden har beskrivits i detalj av bland annat Bertin och Loeb (1976) och översiktligt av Ward (1990).



Figur 12. Skiss visande IP-fenomenet: a) utsänd ström, b) alstrad elektrisk potential (efter Bertin och Loeb, 1976).

Metodbeskrivning

IP-mätning kan utföras på två olika sätt: transientmätning eller frekvensmätning. Vid transientmätning använder man en fyrkantvåg med omväxlande polaritet, och mäter avklingningsförloppet efter strömmen stängts av. Avklingningsförloppet ger ett mått på polariserbarheten i marken. Vid frekvensmätning mäter man resistiviteten vid två eller fler frekvenser, oftast i intervallet 0.03-3 Hz. Förhållandet mellan resistiviteterna mätta vid olika frekvens kallas frekvensseffekt.

Mätförfarandet för IP-mätning är i princip detsamma som för resistivitetsmätning: profilering, sondering eller kombinerad profilering-sondering. Mättekniskt är det dock betydligt svårare att göra IP-mätningar än resistivitetsmätningar. Detta beror dels på att spänningsskillnaderna man skall mäta är avsevärt mindre, och dels på att man mäter under icke-stationära förhållanden. De små spänningsskillnaderna gör att man normalt måste använda icke-polariserbara elektroder för potentialmätningen. Mätning under icke-stationära förhållanden gör bland annat att man lätt får problem med elektromagnetisk koppling (EM-koppling), vilket begränsar möjligheterna att använda vissa elektrodkonfigurationer. Det försämrar också möjligheterna att på ett relativt enkelt sätt bygga mätsystem för datorstyrd mätning, eftersom de många ledarna i ett kabelsystem kan ge upphov till svårbemästrad EM-koppling.

Utvärderingsmetodik

Tolkningen av IP-data görs i princip på samma sätt som för resistivitetsdata. IP-mätningar ger alltid även resistivitetsdata varför det finns generella tolkningsprogram som inkluderar såväl IP-effekterna som resistiviteten.

Potential och begränsningar

IP-metoden är förmodligen av begränsat intresse för dammundersökningar, med nuvarande teknik för datainsamling. Den ytterligare information som erhålls vid IP-mätning, förutom vanlig resistivitet skulle möjligen kunna vara relevant för dammundersökningar. Eftersom det är tekniskt mera komplicerat att göra IP-mätning av god kvalitet än en SP-mätning och resistivitet blir IP-mätningarna svåra att motivera.

3.2.3. Elektromagnetiska metoder

Metoder där elektromagnetisk energi används för att undersöka geologiska förhållanden är exempelvis:

- VLF (induktiv metod)
- Slingram - ” -
- georadar
- borrhålsradar

Elektromagnetiska undersökningsmetoder registrerar skillnader i elektriska egenskaper hos olika marklager (konduktivitet, σ , alternativt relativ dielektricitetskonstant, ϵ_r). Dessa egenskaper är främst beroende av vattenkvot, vattnets och jordlagrens innehåll av joner samt markens fördelning av mineral med olika ledningsförmåga. Indirekt ger dessa information om markens porositet, kornstorlek mm.

Mätprincip

Elektromagnetiska metoder använder sig antingen av ett kontinuerligt alternerande elektromagnetiskt fält eller en kort elektromagnetisk puls. För de induktiva metoderna gäller att magnetfältet är ett alternerande kontinuerligt fält vilket alstras på konstgjord väg. Detta primära magnetfält inducerar elektriska strömmar i ledande zoner i marken. Strömstyrkan beror av grundens elektriska ledningsförmåga. Strömmarna ger i sin tur upphov till ett sekundärt alternerande magnetfält. Genom mätning av det resulterande magnetfältet (summan av det primära och det sekundära magnetfältet) vid markytan fås information om markens ledningsförhållanden. Elektromagnetiska undersökningsmetoder kräver ej markkontakt.

Principen för georadar- och borrhålsradarmätningar skiljer sig från övriga elektromagnetiska metoder. Borrhålsradarmätningar kan utföras som enkelhåls- eller mellanhålsmätningar. Georadar- och enkelhålsmätningar bygger på principen att korta pulser av elektromagnetiska vågor med hög frekvens (radarvågor) reflekteras vid gränser mellan lager med olika relativ dielektricitetskonstant (eller elektrisk impedans). Genom registrering av tidsförskjutningen mellan utsänd och mottagen puls kan avståndet till lager med olika ledningsförmåga, mot vilka den elektromagnetiska pulsen reflekterats, bestämmas. Vid mellanhålsmätningar fås information om egenskaperna hos materialet i ett vertikalt plan mellan två borrhål genom mätning av radarvågornas amplitud och gånghastighet mellan borrhålen.

Det elektromagnetiska fältets utbredning i mark beror av sändarfrekvensen och markens ledningsförmåga. Generellt gäller att bra ledare (t ex lera) och/eller hög frekvens ger ringa inträngningsdjup, varför den inducerade strömmen/elektromagnetiska pulsen kommer att röra sig i och ge information om markens ytliga lageruppbyggnad. På samma sätt gäller att inträngningsdjupet ökar för lägre frekvenser och/eller dåliga elektriska ledare, t ex grus över grundvattenytan.

3.2.3.1. VLF

VLF-metoden bygger på detektering av inducerade elektromagnetiska fält, där man utnyttjar avlägsna radiosändare som signalkälla. Metoden är lämpad för lokalisering av zoner med kraftigt avvikande elektriska egenskaper, exempelvis krosszoner i berg. Metoden bedöms ha liten potential för undersökningar av dammar, medan viss potential finns för lokalisering av eventuella läckagevägar under dammen. ⁴

Allmänt

VLF-metoden (Very Low Frequency) är speciellt utvecklad för att registrera formationer i mark med avvikande elektriska ledningsegenskaper (VLF-anomalier). Typiska mätobjekt är gränser mellan bergarter med stora skillnader i ledningsförmåga och skivformade vertikala formationer med särskilt god ledningsförmåga, t ex vattenförande sprickzoner. Styrkan i en VLF-anomali är beroende bl a av skillnaden mellan den elektriska ledningsförmågan i den vattenförande sprickzonen, som ger upphov till anomalin, och den omgivande berggrunden. De starkaste anomalierna erhålls i högresistiva urbergsområden, medan sprickor i sedimentär kalksten ger svagare anomalier. Då den ökade ledningsförmågan i sprickzonen huvudsakligen är ett resultat av dess högre vatteninnehåll bör anomalistyrkan även stå i proportion till vatteninnehållet, se STU-rapport 80-4151.

Mätförfarande

Källan till de elektromagnetiska fält som utnyttjas i VLF-metoden är militära radiosändare vilka sänder inom frekvensintervallet 15-30 kHz. Sändarna täcker i princip in hela jorden. Det är även möjligt att sätta upp en egen portabel sändare i närheten av mätområdet.

VLF-mätningar kan göras från flygplan eller vid markytan. SGU har tagit fram en serie sk RAMA-kartor, vilka är baserade på resultaten från flygburna VLF-mätningar. Från RAMA-kartorna fås indikationer på om stora regionala sprickzoner förekommer vid ett dammläge. Med utgångspunkt från dessa kan kompletterande mätningar nedströms och från dammkroppen planeras. Tydligast utslag, dvs kraftigast anomalier, uppkommer för sprickzoner vilka skär profillinjerna vinkelrätt. För att fånga upp formationer i alla riktningar kan mätningar göras dels parallellt med dammen och dels längs tvärgående profillinjer, vilka sträcker sig upp över dammkrönet.

Potential och begränsningar

Områden i en dammkropp med förhöjd porositet, och därmed förhöjd vattenkvot, kan i princip lokaliseras med VLF-mätning om kontrasten mellan läckagezonen och omgivande material är tillräckligt stor. En förändring av vattenkvoten med 1 procentenhet ger upphov till ca 5 % relativ förändring av konduktiviteten. Med hänsyn till den låga kontrasten bedöms VLF-metodens potential för detektering av läckagezoner i en dammkropp i ett tidigt skede vara liten. Denna bedömning kan också grundas på "normala" läckagezoners storlek och geometri. VLF-metoden är nämligen framtagen för detektering av stora vertikala formationer ned till stora djup. Enligt ABEM (1989) skall en sprickzon vara minst omkring 0,5-1 m bred, 10 m djup och 50 m lång för att ge ett tydligt utslag.

Metoden är ej lämplig för detektering av horisontella läckagezoner. Kablar, metallrör, kraftledningar, metalltrådstaket m m utgör felkällor då dessa orsakar liknande anomalier som zoner med förhöjd vattenkvot.

3.2.3.2. Slingram

Slingrammetoden mäter markens elektriska egenskaper induktivt med hjälp av egen sändare och mottagare. Slingrammar kan vara utformade för att lokalisera zoner med avvikande elektriska egenskaper, liknande VLF-metoden, eller att mäta markens konduktivitet. Metoden bedöms ha relativt liten potential för undersökning av dammar.

Allmänt

Slingrammetoden används bl a för bestämning av jordlagerföljder och för studium av spridningsplymer från föroreningar. Den lämpar sig bra för att lokalisera och bestämma djupet till en god elektrisk ledare.

Metodbekrivning

Ett slingraminstrument består bl a av en sändar- och en mottagarpole. Genom att relatera den resulterande fältstyrkan, vilken mäts i mottagarspolen, till primärfältets styrka fås fältstyrkan för ett relativt magnetfält. Denna relativa fältstyrka ger information om markens genomsnittliga ledningsegenskaper. Inträngningsdjupet är beroende av sändar- och mottagarantennens inbördes avstånd, sändarfrekvensen och markens egenskaper.

Mätförfarande

En traditionell slingramutrustning sköts av två personer, där den ena bär sändar- och den andra mottagarantennen. Avståndet mellan spolarna kan således varieras. Penetrationsdjupet bestäms av sändarfrekvens, ca 0,5-20 kHz, och inbördes avstånd mellan spolarna, några tiotal meter, och varierar mellan ca 7 och 60 m. Generellt gäller att inträngningsdjupet halveras då spolarna reses från horisontell till vertikal position. Mätningen är kontinuerlig, enkel och snabb, några km kan undersökas på en dag. Noggrannheten vid lokalisering av gränssytor är ca $\pm 5\%$ av mätdjupet.

Högfrekvensslingram, med närmare 20 kHz sändarfrekvens, är lämpliga för detektering av sprickzoner i berg. Det minsta slingraminstrumentet kallas stångslingram och sköts av en person. Det har sändare och mottagare monterade i respektive ände av en ca 4 m lång stång. Sändarfrekvensen är konstant ca 10 kHz, och inträngningsdjupet beror endast av markens egenskaper. Inträngningsdjupet är normalt i storleksordningen 6 m. Lämplig mark vid mätning är t ex sand, grus och asfaltytor.

Potential och begränsningar

Stångslingram är särskilt lämplig för undersökning av mark uppbyggd av två jordartslager alternativt ett jordartslager på berg. Högfrekvensslingram bör kunna användas för lokalisering av läckagezoner i berg. Generellt sett gäller att slingram ger större detaljupplösning än VLF, men att den har mindre djupkänning.

3.2.3.3. Georadar

Principen för georadar är att en kort elektromagnetisk puls (radiopuls) sänds ner i marken. Pulsen reflekteras mot elektriska diskontinuiteter. Dessa kan utgöras av skillnader i elektrisk ledningsförmåga eller radiovågshastighet. Översatt till jordartsp parametrar är det avvikelser i kornstorlek och vattenkvot som utgör diskontinuiteter. Metoden har stor potential för tillståndskontroll, men den lämpar sig sämre för övervakning.

Allmänt

Georadar bygger på principen att en mycket kort elektromagnetisk puls av monocykelkaraktär sänds ut. Av pulsen kommer andelen r att reflekteras mot gränsskikt mellan lager (1 och 2) med olika elektrisk impedans, Z . Andelen $1-r$ transmittas. Den elektriska impedansen är frekvensberoende och bestäms av dielektricitetsstalet, ϵ_r , elektrisk konduktivitet, σ , samt magnetisk susceptibilitet, μ .

$$r = (Z_2 - Z_1) / (Z_2 + Z_1)$$

$$Z_1 = [j\omega\mu / (\sigma + j\omega\mu)]^{1/2}$$

Radiovågorna dämpas när de utbreder sig genom dammaterialet. Dämpningen är av tre slag: geometrisk spridning av energin när den avlägsnar sig från antennen, spridning genom reflektion mot småobjekt i utbredningsvägen samt genom absorption. Absorptionen ökar med ökande frekvens och beskrivs enligt sambandet nedan.

$$E = E_0 \cdot e^{-a \cdot x}$$

Det strikta uttrycket för att beräkna a är komplicerat men för att beräkna om man får någon penetration kan man använda uttrycket:

$$Q = \omega \sigma \epsilon_r$$

Om Q är större än 1 kommer man att få penetration.

Upplösningen, dvs förmågan att särskilja näraliggande objekt, blir bättre när bandbredden ökas. Bandbredden definieras som skillnaden mellan högsta och lägsta utsända frekvens dividerat med medelfrekvensen. Pulsen från typiska georadarantennerna har ett gaussformat frekvensspektrum med en relativ bandbredd på cirka 60%. Högfrekvensantennerna kan ha större bandbredd, men de är inte av något intresse för undersökning av fyllningsdammar, då penetrationen endast är några decimetrar.

Upplösning och penetration kan optimeras med antennbyte. Det finns idag kommersiella system med antenner vars centerfrekvenser ligger i området 10–2 500 MHz. Upplösningen för de lågfrekventa är i storleksordningen tiotals meter medan de högfrekventa har en upplösning av ett par centimetrar.

Samtliga kommersiella radarsystem använder sig av korta pulser av monocykkelkaraktär. Därigenom erhålles hög upplösning momentant utan några tidskrävande beräkningar. I princip kan bandbredden även åstadkommas med snabbt (chirp) eller långsamt frekvenssvep (swept sine) eller med brus. Experimenterande med alternativa vågformer är hittills begränsat till långsamt frekvenssvep och man har då använt sig av en nätverksanalysator som sändare och mottagare. En radar av denna typ finns på Naturgeografiska Institutionen vid Stockholms Universitet.

Metodbeskrivning

Georadar för dammundersökningar utnyttjar antenner med frekvenser i området 80 - 500 MHz. Den lägre frekvensen är lämplig för att undersöka dammens struktur i stort, medan den högre frekvensen lämpar sig för undersökning av tåtkärnans läge relativt dammkrönet. Antennerna innehåller den pulsformande elektroniken och denna kan inte påverkas.

Man kan använda samma antenn som sändare och mottagare eller separera dessa funktioner. Delar man på antennerna minskar reflexerna från ytnära objekt och djupare reflexer framträder klarare.

Eftersom antennerna är små relativt våglängden kan man i allmänhet inte styra radarstrålen genom att vrida antennen. Det enda sättet att fokusera energin är att ha ett system med flera antenner. Ett flerantennsystem kan även användas för att öka säkerheten i bedömningen av data eller för att alstra information med tre dimensioner.

Antennerna kopplas till en huvudenhet, vilken styr mätförfarandet och ibland även innehåller möjlighet att lagra mätdata. De mest kvalificerade radarsystemen kommunicerar med en dator, de har inga externa reglage. Datorn används för att styra radarinstrumentet samt för att lagra data. Om man önskar utföra upprepade mätningar är det en stor fördel att ha ett datorstyrt radarinstrument. Genom att lagra styrprogrammet på en diskett, kan man när som helst konfigurera radarinstrumentet att göra en mätning med identisk inställning. Vissa system innehåller också möjlighet att styra datatagningen med hjälp av ett mätjul. Fördelen med detta är att man får data med konstant avstånd mellan mätpunkterna, oberoende av fordonshastigheten.

Mätförfarande

En georadarundersökning av en fyllningsdamm utföres vanligen med radarn monterad i ett fordon, jfr figur 13. Beroende på avsikten med undersökningen kan antennerna släpas på marken med en släde efter fordonet eller monteras fritt i luften baktill eller framtill på fordonet. Alla antenner är inte lämpade för montage i luften, eftersom det kan uppstå missanpassning mellan sändarelektroniken och antennen. Allmänt kan sägas att för undersökningar där stor penetration eftersträvas bör antennen vara nära marken. Dock är det inte nödvändigt att det råder fysisk kontakt mellan antennen och marken.

Vissa system tillåter att flera antenner används vid samma mättillfälle, vilket ger flera parallella och kontinuerliga mätprofiler. Det är också möjligt att utföra mätningar med antenner med olika frekvens, vilket ger registreringar med olika penetration och upplösning.



Figur 13. Georadarmätning med fem antenner för lokalisering av tät kärnans krön.

Flerantennmätningar kan också utföras för att alstra tredimensionella data. Om antennerna arrangeras vinkelrätt mot dammkrönets riktning, kan man t ex bedöma tåtkärnekrönets lutning relativt dammkrönets riktning. Man kan också tänka sig att antennerna placeras längs dammkrönets riktning. Man får då likvärdiga data med viss förskjutning. Används mätthjul för att få hastighetsoberoende mätvärden kan data läggas ihop till ett diagram med förbättrat signal-brusförhållande. I båda fallen får man större tillförlitlighet i sina data än om endast en antenn används.

Centralt vid all georadarmätning är uppskattning av radiovåghastigheten i det undersökta materialet. Det kan ske genom identifiering av reflexer från kända objekt i dammkonstruktionen, genom jämförelse med borrhning eller provgrop eller genom speciella mätförfaranden som medger beräkning av radiovåghastigheten. Dessa mätförfaranden är Common Depth Point (CDP), Wide Angle Refraction Reflection (WARR) och beräkning med hjälp av reflexer från punktformade reflektorer.

CDP mätningen förutsätter att man har minst tre antenner, nedan betecknade 1, 2 och 3. De yttre antennerna placeras symmetriskt kring den mellersta antennen. Om man sänder i ordningen 1, 2, 3 och mottar i ordningen 3, 2, 1 får man en strålgång som gör att man kan beräkna djupet till en punkt rakt under antenn 2 med hjälp av reflextiderna och antennavstånden. Det förutsätts att punkten ligger på en med markytan parallell gränssyta. Metoden lämpar sig i princip väl för kontinuerliga mätningar. Det har emellertid vid praktiska försök på fyllningsdamm visat sig vara omöjligt att få den noggrannhet i geometri som krävs för att man skall kunna göra beräkningar av tåtkärnedjup på några meter. Det krävs en helt plan dammöveryta för att geometrin skall vara tillräckligt bestämd eftersom antennernas höjd varierar under mätningen.

WARR metoden är snarlik CDP men man använder endast två antenner. Dessa står ursprungligen intill varandra men flyttas isär successivt under mätningen. I varje position bestäms reflextiden. Ur sambandet antennavstånd / reflextid kan djupet till reflektorer bestämmas. Metoden förutsätter stillastående mätningar och kan således endast tillämpas punktvist.

Beräkningen av radiovåghastighet kan också ske om man har punktrelektorer i dammkroppen. En punktrelektor ger upphov till en hyperboliskt formad kurva i radardiagrammet. Spetsen är belägen på det djup reflektorn ligger och benens vinkel är proportionell mot hastigheten. Ju större hastighet desto trubbigare hyperbol. Erfarenhetsmässigt är det ont om punktformade reflektorer i en jorddamm

Radiovågorna tränger genom is och färskvatten (till skillnad mot saltvatten) varför man från isytan kan undersöka sedimentmaktigheter uppströms dammen. Man kan även tänka sig att mäta in i dammen från isen strax uppströms.

Utvärderingsmetodik

Utvärdering av georadardata sker först genom att radargram ritas ut. Dessa visar reflexernas styrka som funktion av tid (y-axeln) och läge (x-axeln). Pappret svärtas i proportion till hur stark reflexen är men dynamiken i svärtningen är oftast för dålig för att man skall kunna göra en bedömning av reflexstyrkan. Radargrammet medger bestämning av reflextider och ger genom sin intuitiva tolkbarhet en god uppfattning om fyllningsdammens uppbyggnad. Eftersom data är lagrade i digital form är det enkelt att skriva datorrutiner som följer en viss reflex och ritas ut dess styrkevariationer i x-led. Ett sådant diagram kan ritas ut parallellt med radargrammet.

Georadarmetoden lämpar sig väl för repeterade mätningar, speciellt om man har ett bra system för att knyta lagrade data till kontrollpunkter på dammen. Man kan då använda samma redovisningsprogram vid varje måttillfälle och därigenom minskas utvärderingskostnaden betydligt. Med repeterade mätningar får man möjlighet att studera naturliga variationer i dammens elektromagnetiska signatur. Genom att beräkna differensbilder kan man se var förändringar ägt rum. När tillräcklig erfarenhet erhållits kan man kvantifiera en avvikelse.

Potential och begränsningar

Georadar har med framgång använts på jorrdammar. Noggrannhet och upplösning är mycket god förutom vid diffusa skador och förändringar i dammkroppen. Reflexerna uppstår främst som reaktion på förändringar i vattenkvot och elektrisk konduktivitet och kan väl därmed sägas vara väl kopplad till den primära parametern porositet, åtminstone i den vattenmättade delen av dammkonstruktionen. Skyddas tåtkärnan och filter av ett tjockt lager sprängsten (bombskydd) kan det pga spridning i detta lager vara svårt att få en reflex från tåtkärnan. I höga jorrdammar kan dämpningen i det finkorniga jordmaterialet i tåtkärnan bli så stor att man inte får några reflexer från dammens undre delar. Radardata har ingen koppling till parametern läckvattenhastighet. Sannolikt kommer metoden inte att utvecklas principiellt inom en nära framtid. Däremot kommer säkert presentationstekniken för mätdata att utvecklas.

3.2.3.4. Borrhålsradar

Principen för borrhålsradar är att en elektromagnetisk signal skickas ut i jorden från en antenn i ett borrhål infodrat med plaströr. Pulsens hastighet och amplitud påverkas när den passerar jorden mellan två borrhål. I det andra borrhålet finns en mottagande antenn. Pulsens styrka och ankomsttid utnyttjas för att räkna ut hur dämpning och hastighet varierar i det plan som ligger mellan borrhålen. Genom tomografisk analys kan porositetsvariationer registreras. Metoden bedöms vara lämplig för undersökning av begränsade områden i fyllningsdammar.

Allmänt

Borrhålsradar har i Sverige hitintills huvudsakligen använts för undersökning av bergkvalitet för undermarksanläggningar, exempelvis för deponering av radioaktivt avfall. Sprickzoner, bergartsgränser och hålrum har kartlagts med gott resultat. Mätningar har också gjorts som ett utvecklingsprojekt i två fyllningsdammar, Stenkullafors och Suorva, Andersson et al (1992).

Metodbeskrivning

Instrumentet har separata sändar- och mottagarantennar. Sändarantennen skickar ut en kort elektromagnetisk puls, som utbreder sig i omgivande material. Mottagaren tar emot den utsända pulsen, förstärker signalen och registrerar dess styrka som funktion av tiden. Tidsförskjutningen mellan utsänd och mottagen puls, som beror på radarvågornas utbredningshastighet, ger information om markens egenskaper.

Radarvågors gånghastighet i jord och berg beror på materialets dielektricitetskonstant, ϵ_r , vilken i sin tur till största del är beroende på markens vattenkvot. Variationer i jordartstyp, densitet och temperatur påverkar endast ϵ_r marginellt. Dielektricitetskonstanten är emel-

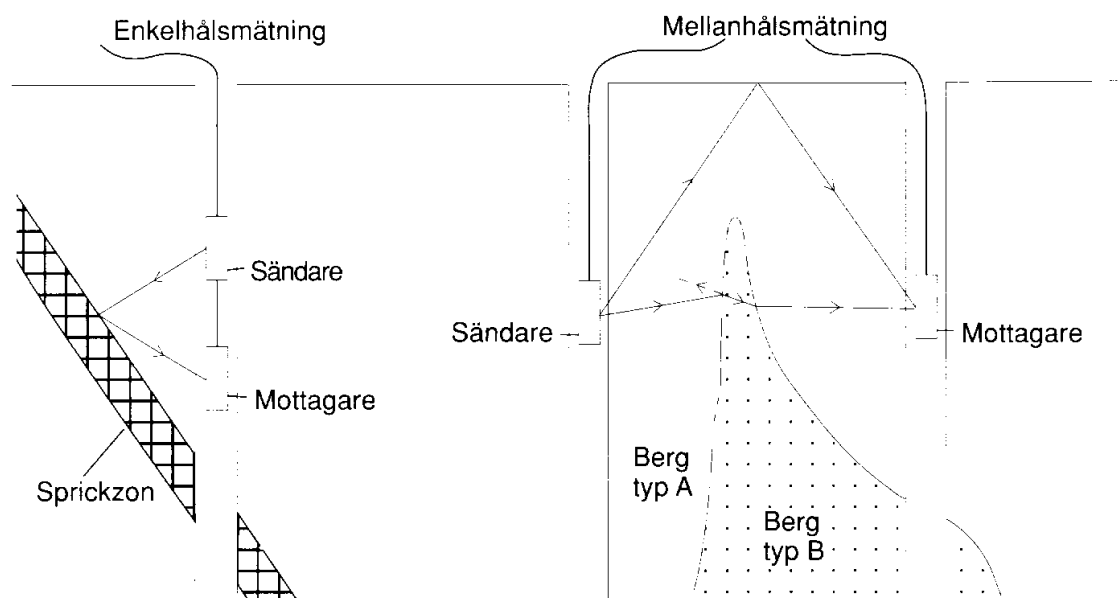
lertid frekvenberoende, och minskar för höga frekvenser. Detta medför att ledningsförmågan och därmed även dämpningen ökar för höga frekvenser, vilket leder till att räckvidden avtar. De radarsystem som används idag för geologisk kartering i olika former arbetar normalt inom frekvensområdet 10 – 900 MHz. Borrhålsradar använder vanligtvis frekvenser lägre än 100 MHz.

Mätförfarande

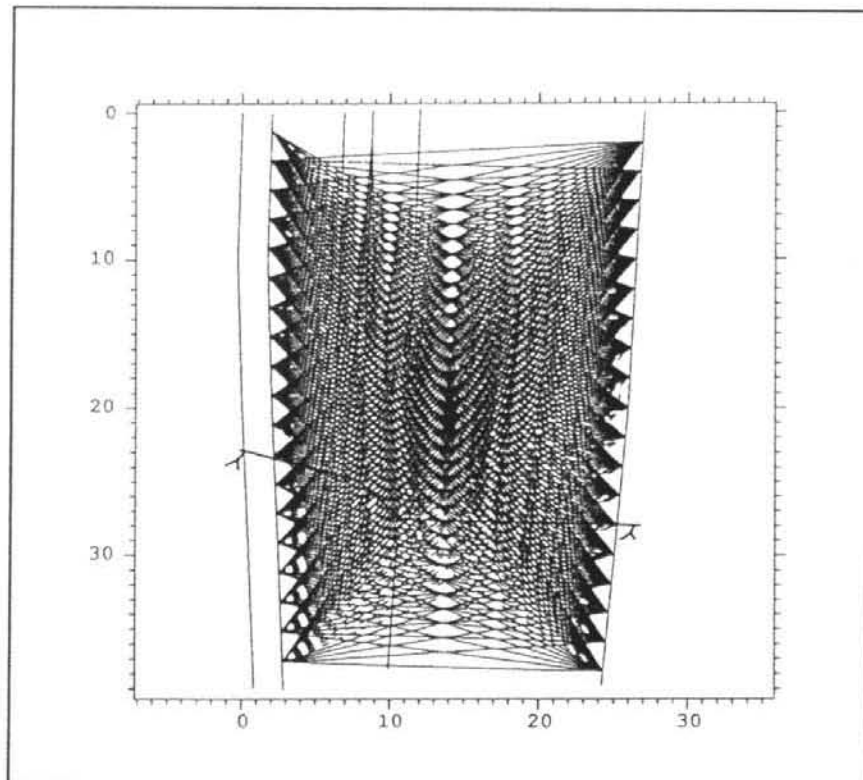
Mätningar kan utföras som enkelhåls- eller mellanhålsmätningar. Eftersom stålrör avskärmar radarpulserna måste foderrör av plast användas i borrhålen. **Enkelhålsmätningar** kallas även reflektionsmätningar och går till på så vis att sändare och mottagare sänks ner i samma borrhål. Sändarantennen skickar ut radarpulser, vilka reflekteras mot en gränssyta mellan material med olika relativ dielektricitetskonstant. Mottagarantennen tar emot de reflekterade vågorna. Genom att mäta tidsförskjutningen mellan utsända och mottagna pulser kan avståndet till reflektoreorna beräknas, under förutsättning att vågornas gånghastighet i materialet är känd.

Vid **mellanhålsmätningar** (Cross-Hole) placeras sändare och mottagare i skilda borrhål. Vid mätning hålls en antenn stilla i borrhålet medan den andra systematiskt flyttas mellan mätpositioner utmed borrhålets hela längd. Därefter flyttas den första antennen till nästa mätposition, och proceduren upprepas. På så vis görs mätningar för alla möjliga mätuppställningar. Hastighet och amplitud hos radarvågorna ger information om egenskaperna hos materialet mellan borrhålen.

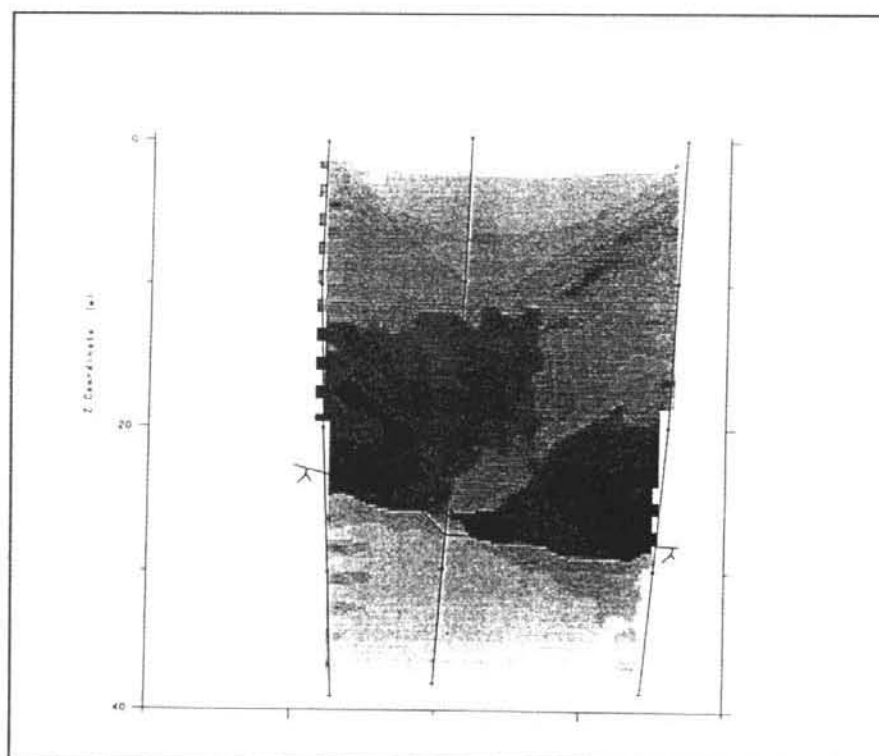
Vid mätning i en fyllningsdamm med en sändarfrekvens på 45 – 50 MHz blev räckvidden ca 25 – 30 m för enkelhålsmätningar respektive överstigande 40 m för mellanhålsmätningar enligt Andersson et al (1992). Upplösningen mellan två närliggande objekt är cirka 1 m (halva våglängden). Genom utveckling av antenner med högre sändarfrekvens skulle upplösningen kunna förbättras, dock på bekostnad av räckvidden. Avgörande för om ett objekt kan detekteras är dock främst skillnaderna i de elektriska egenskaperna mellan objektet och det omgivande mediet. I berg har sprickor med några centimeters vidd detekterats.



Figur 14. Enkelhåls- samt mellanhålsmätning med borrhålsradar, efter Andersson et al (1992).



Figur 15. Strålmönster vid mellanhålmätningar, efter Andersson et al (1992).



Figur 16. Tomogram, där svärtade partier visar förhöjd vattenkvot, efter Andersson et al (1992).

Utvärderingsmetodik

Enkelhålmätningar kan redovisas i form av radargram, ur vilka reflektorens läge och geometri kan uttolkas. En nackdel är att ingen information om i vilken riktning i horisontalled från borrhålet som reflektorn ligger fås. Mellanhålmätningar kan redovisas i form av tomogram. I ett tomogram indelas planet mellan borrhålen i ett antal celler, för vilka radarvågornas gånghastighet och därmed dielektricitetskonstanten bestäms. En förutsättning för att materialets egenskaper skall kunna bestämmas är att så pass många mätkombinationer finns att flera strålar skär samma cell. Tomogrammen ger en överskådlig bild av vattenkvotens variation i planet mellan borrhålen.

Upplösningen mellan två närliggande objekt är ungefär lika med halva våglängden, men beror även på centrumavståndet mellan borrhålen. Den vertikala upplösningen försämrar i sektionens mitt med ökande c-c avstånd på grund av minskande täthet av skärande radarstrålar (huvudsakligen horisontella radarstrålar).

Potential och begränsningar

Med borrhålsradar detekteras zoner med avvikande dielektricitetskonstant, vilket i princip innebär att materialet har avvikande vattenkvot. Vid undersökning av fyllningsdammar kan på så vis potentiella läckagezoner med förhöjd porositet och vattenkvot detekteras med mycket god noggrannhet och upplösning.

För korrekt tolkning av mellanhålmätningar måste vattenkvotens naturliga variation vara känd. Först då kan onormala värden, som överstiger erfarenhetsmässigt satta gränsvärden, urskiljas och framhävas. Metoden har därför störst potential vid incidentundersökningar, där mätbara porositetsvariationer kan förväntas.

3.2.4. Radioaktiva metoder

Gamma- och neutronloggning bygger på att en sond med en radioaktiv källa och mottagare sänks ner i marken genom ett borrhål. Andelen till sonden reflekterad gammastrålning står i proportion till densiteten och i viss mån också till porositeten i marken. Antalet till sonden återkomna neutroner beror av vattenkvoten i marken. Metoderna har begränsningen att endast området mycket nära borrhålen undersöks, men de ger information om uppmätta parametrars förändring vertikalt i dammen. Eftersom denna information har samma information har samma noggrannhet oberoende av djup, är den värdefull för kalibrering av de ytgeofysiska metoderna. De radioaktiva metoderna är enbart lämpliga för tillståndskontroll.

Allmänt

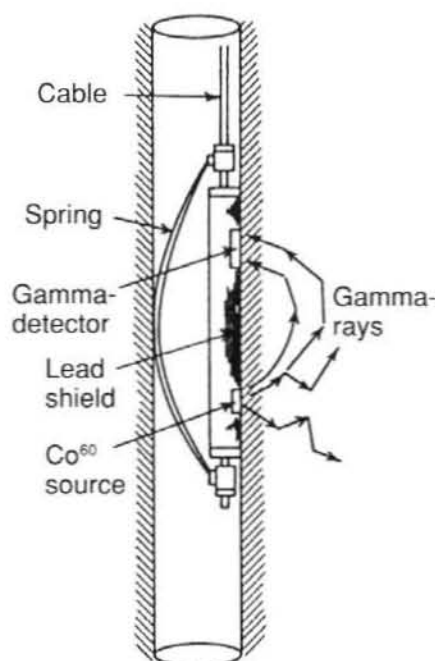
Undersökningsmetoder som innebär utsändning av radioaktiv strålning kan av naturliga skäl endast komma i fråga för undersökning i borrhål och grundvattenobservationsrör, där järnrör ej utgör något hinder för mätningarna. Radioaktiv strålning förekommer i form av α -, β - eller γ -strålning eller i form av neutronflöde. Både γ -strålning och neutroner har god förmåga att penetrera fasta material och används därför vid geofysisk borrhålsloggning.

Metodbeskrivning

γ -loggningssinstrument med endast mottagare används för registrering av naturligt utsänt γ -strålning för att skilja på olika typer av berg- eller jordarter. γ -strålningens energispektra ger

nämligen direkt information om de relativa förekomsterna av uran, torium och kalium. I en förlängning kan informationen även användas till att ge indikation på vätskeflöden i bergssprickor.

Man kan även ha en radioaktiv källa i sonden som sänder ut γ -strålning. γ -strålningen kommer att dämpas då den penetrerar omgivande jordlager. Dämpningen är direkt proportionell mot materialets densitet eller egentligen elektrontäthet, jfr blykragar hos tandläkaren. Eftersom det ofta finns ett samband mellan berg/jordlagars densitet och dess porositet har instrument som själva både sänder ut och tar emot tillbaka reflekterad γ -strålning (gamma-gamma instrument) kommit att användas för bestämning av porositeten i omgivande mark samt för bestämning av packningsgrad.



Figur 17. Aktivt γ -loggningsinstrument (gamma-gamma).

Penetrationsdjupet för ett aktivt γ -loggningsinstrument minskar exponentiellt med ökad densitet hos omgivande jordmaterial. Maximalt penetrationsdjup har angetts till 8 – 15 cm, Telford et al (1976). Djupet kommer även att bero på observationsrörets godstjocklek samt instrumentets kontakt mot dess innervägg.

Ett neutron-loggningsinstrument har en radioaktiv källa som sänder ut neutroner med hög energinivå (snabba neutroner). Neutronerna kommer att saktas ned då de kolliderar med atomer i materialet vid sidan av borrhålet. Störst uppbromsning får neutronerna då de kolliderar med atomer med samma massa som de själva. Väteatomer vilka endast innehåller en proton samt en elektron har en massa som nära överensstämmer med neutronens. När en neutron bromsats upp genom kollisioner kommer dess energinivå (hastighet) att vara ungefär samma som omgivande atomers (<0,025 eV). Den uppbromsade neutronen kan sedan fångas in av en lämplig atom varvid energi i form av γ -strålning frigörs. Det behöver inte vara en väteatom som fångar in neutronen. Neutron-loggningsinstrumentet kan ha en mottagare som registrerar antal återkomna snabba eller långsamma neutroner eller den γ -strålning som utsänts då neutronerna togs upp.

Eftersom vatten är den största källan för väteatomer i marken, och i dammar i stort sett den enda, kommer instrumentet att registrera vattenkvoten i dammen närmast observationsröret. Det går att mäta vattenkvoten både i den mättade och i den omättade zonen.

Penetrationsdjupet är beroende av omgivande jordlagars porositet och vattenkvot. Om det finns många väteatomer/joner att krocka med, blir penetrationsdjupet mindre. Penetrationsdjupet beror också på givarens styrka, fasta partiklarnas densitet och närvaro av andra starka neutronabsorberare som exempelvis klor och brom. Observationsrörets godstjocklek samt eventuell cementering har också betydelse. Praktiskt gräns för penetrationsdjup för ett mindre neutron instrument för 2"-rör är mellan 15 och 60 cm, Telford et al, (1976) samt Kramer et al (1992).

Mätförfarande

Det finns på marknaden loggningsinstrument för både γ -loggning och neutron-loggning vilka går att använda i klena borrhål (2"). Det är en fördel om instrumentet har en fjäder som trycker fast det mot borrhålsväggen.

Mätningen börjar i botten av borrhålet och loggningsinstrumentet lyfts långsamt upp med hjälp av en vinsch. Instrumentet registrerar hela tiden antal registreringar per tidsenhet. I loggningssonden sitter givare, mottagare och förstärkare. Uppmätta mätvärden lagras kontinuerligt i en mätenhet på markytan. Enheten kan vara counts/second (CPS) eller count ratios som är antal registreringar i det aktuella intervallet i förhållande till antal registreringar i ett referensmaterial.

Utvärderingsmetodik

Alla radioaktiva metoder är statistiska metoder. Det är därför inte givet att man får exakt samma mätvärde från samma zon vid två på varandra följande mätningar. Trenderna blir dock alltid desamma. Detta innebär att mätvärdena blir säkrare ju längre tid mätinstrumentet uppehåller sig vid det intervall som undersöks. Metodens noggrannhet försämras därför med ökande mät hastighet.

Noggrannheten hos mätvärdena för en uppmätt fysikalisk parameter som t ex porositet beror förutom av den statistiska bearbetningen av mätdata även av instrumentens kalibrering. Genom att kalibrera instrumenten i laboratorium där förhållandena är så lika de i dammen som möjligt samt med väl kända värden på porositet, densitet och vattenkvot kan mät noggrannheten i fält förbättras.

För standardkalibrerade mindre neutron-loggningsinstrument framtagna för vattenkvotsbestämning i den omättade zonen räknar man med att skillnader i vattenkvot på 1 – 5 volymsprocent är möjliga att mäta.

Potential och begränsningar

För dammundersökningar borde det i första hand vara de aktiva metoderna (med egen radioaktiv källa) som kan komma i fråga. Metoderna har begränsningen att endast området mycket nära borrhålen undersöks.

Till metodernas fördel talar dock att de är snabba och enkla att använda. De fungerar också, till skillnad från flera andra geofysiska loggningsmetoder, bra även i stålrör vilket ju är det vanligaste materialet i nedborrade observationsrör i dammar. Även om metoderna har

begränsad undersökningsradie utanför borrhålet ger de information om uppmätta parametrars förändring vertikalt i dammen. Eftersom denna information har samma noggrannhet oberoende av djup, vilket ej gäller de ytgeofysiska metoderna, är informationen värdefull för kalibrering av dessa.

Genom att kombinera borrhålsgeofysiska metoder med ytgeofysiska kan mer tillförlitliga 2-dimensionella tvärsnitt erhållas.

En möjlig alternativ tillämpning för neutron-instrumentet är att mäta kloridjoner i porvattnet vid spårämnesförsök. Kloridjoner är ca 100 gånger starkare neutronupptagare än vätejoner.

3.3. Analys av läckagevatten

Det vatten som läcker ut nedströms en damm kan dels bestå av "verkligt" läckagevatten som passerat genom fyllningsdammen, dels av vatten som tillförts lokalt på nedströmssidan eller som läcker ut från djupare liggande grundvattenmagasin. Beroende på ursprung har dessa vattentyper ofta olika sammansättning och egenskaper. Genom regelbundna analyser av det blandade nedströmsvattnet är det sannolikt möjligt att bedömma när andelen läckagevatten från dammen ökar.

Analyser av vatten kan utföras med avseende på en rad ämnen och egenskaper. Exempelvis borde vattnets huvudsakliga jonsammansättning och dess turbiditet (grumlighet) kunna vara intressanta i detta sammanhang. Likaså skulle olika former av naturligt förekommande och artificiellt introducerade spårämnen, till exempel isotoper, kunna vara till nytta. Av den begränsade mängden litteraturreferenser att dömma förefaller det dock som om vattenanalyser för att detektera läckage från dammar hittills har utnyttjats i relativt liten omfattning, se bland andra Burgman, Eriksson, Kostov och Möller (1978), Leonov och Svitel'skaya (1990), Williams (1986) samt Yost och Naney (1974).

3.3.1. Hydrokemisk analys

Kemisk analys av läckagevatten bygger på att vattnets sammansättning är beroende av förändringar i läckvattnets flöde och/eller strömningshastighet. Genom regelbundna analyser av vattnet nedströms en damm är det i många fall möjligt att bedöma när andelen läckagevatten ökar. Metoden är särskilt lämplig för kontinuerlig övervakning med hjälp av elektroder för mätning av enskilda joners koncentration och vattnets elektriska ledningsförmåga.

Metodbeskrivning

Vattnet i magasinet har normalt relativt låga halter av de flesta lösta joner. Vid små läckagemängder genom dammkroppen löses ofta olika ämnen i fyllningsmaterialet av det långsamt framsipprande "läckagevattnet", vilket därvid erhåller grundvattenkaraktär. I allmänhet innehåller därför det "verkliga" läckagevattnet ganska stora mängder lösta joner. Mängden lösta joner minskar ofta successivt då dammen blir äldre. Om läckageflödet genom dammen ökar hastigt bör läckagevattnets salthalt minska markant.

Huruvida läckagevattnet med framgång ska kunna skiljas från övrigt vatten nedströms dammen med denna metod beror på om det finns tillräckligt stora skillnader i kemisk sammansättning mellan vatten med olika ursprung. Dessa förutsättningar varierar från plats till plats, främst beroende på hur lättupplösta omgivande jord- och bergarter är samt dammens ålder och sammansättning.

Kemisk analys av läckagevatten kan antingen göras direkt på platsen av personalen vid dammen med hjälp av ett portabelt fältlaboratorium eller också kan prov insamlas i flaskor och sändas till ett auktoriserat laboratorium. Om undersökningarna koncentreras på ett eller två ämnen för vilka fältlaboratoriet fungerar väl, kan ofta den första metoden vara lämplig. Vid mera omfattande analyser av vatten från flera provtagningspunkter är det vanligen lämpligare att anlita ett komplett vattenlaboratorium.

Utvärderingsmetodik

Resultat jämförs från samtidiga mätningar i och nedströms dammen, på nederbördsvatten och i de grundvattenmagasin som bedöms kunna läcka till yt- och grundvattnet nedströms dammen. En första tolkning kan ofta göras enbart utifrån siffervärden eller efter att ha presenterat dessa i ett diagram. En kvantitativ beräkning av andelen läckagevatten i vattnet nedströms dammen kan utföras med hjälp av traditionella balans- och utspädningsekvationer.

Potential och begränsningar

Noggrannheten i beräkningarna beror främst på hur väl man känner sammansättningen och eventuella variationer i denna hos de olika vatten som blandas nedströms dammen och hur stora skillnaderna är mellan de olika vattentyperna. Är skillnaderna så små att analysnoggrannheten kan vara avgörande blir de kvantitativa beräkningarna i allmänhet mycket osäkra.

Den geometriska upplösningen i resultaten är i hög grad beroende av hur läckagevatten kan samlas upp nedströms dammen. I de flesta fall kan endast prover erhållas från ett blandvatten, vilket speglar dammens totala läckagesituation. Om det finns möjlighet att ta prover av läckagevatten från olika sektioner av dammen ökar metodens känslighet.

Vattnets kemiska sammansättning är starkt beroende av eventuella förändringar i läckvattnets flöde och/eller strömningshastighet. En utveckling pågår mot bättre och billigare mätelektroder och instrument för kontinuerlig mätning av enskilda joners koncentration. Till denna typ av utrustning kan också pH- och konduktivitetsmätare räknas. En samtidig övervakning av läckvattenflöden och till exempel vattnets elektriska ledningsförmåga borde tillsammans kunna ge en mycket klar signal om läckaget genom dammkroppen förändras.

3.3.2. Turbiditetstest

Turbiditetsmätning (grumlighetsmätning) av vatten nedströms en damm bygger på att ökande värden på turbiditeten indikerar ökat läckage genom dammen. Ju större grumlighet är desto hastigare är i allmänhet läckageströmmen. Metoden lämpar sig för kontinuerlig övervakning genom fasta installationer av turbiditetsmätare.

Metodbeskrivning

Vid små läckagemängder genom fyllningsdammen filtreras vanligen det långsamt fram-sippande vattnet så att grumligheten blir mycket liten. Om vattnets hastighet genom dammen ökar kan inre erosion uppkomma, dvs partiklar från dammens innanmäte bortförs och turbiditeten eller grumligheten i det framträngande läckagevattnet ökar markant.

Huruvida läckagevattnet med framgång ska kunna skiljas från övrigt vatten nedströms dammen med denna metod beror på om det finns tillräckligt stora skillnader i turbiditet mellan vatten med olika ursprung. Detta problem undviks om man har möjlighet att ta prover från enbart det vatten som läckt genom dammen.

Mätning av turbiditeten i läckagevatten kan göras av personalen vid dammen med hjälp av en portabel eller fast turbiditetsmätare. Prov kan också insamlas i flaskor och sändas till ett auktoriserat laboratorium.

Utvärderingsmetodik

Ökande värden på turbiditeten indikerar ökat läckage genom dammen. Ju större grumligheten är desto högre är i allmänhet läckvattenströmmens hastighet. En kvantitativ beräkning av andelen läckagevatten i vattnet nedströms dammen låter sig normalt inte göras med någon större noggrannhet enbart utifrån turbiditetsmätningar. Teoretiskt sett kan dock i stort sett samma balans- och utspädningsekvationer som för vattenkemiska mätningar användas.

Potential och begränsningar

Den geometriska upplösningen i resultaten är i hög grad beroende av hur läckagevatten kan samlas upp nedströms dammen. I de flesta fall kan endast ett blandvatten provtas, vilket speglar dammens totala läckagesituation. Om det finns möjlighet att ta vattenprov från olika sektioner av dammen ökar givetvis möjligheten att bestämma läget av en eventuell läcka.

Vattnets grumlighet är starkt beroende av eventuella förändringar i läckvattnets flöde och i synnerhet i dess strömningshastighet. Sannolikt kommer turbiditetsmätare för kontinuerlig mätning att förbättras under de närmaste åren. En samtidig övervakning av läckvattenflöden och grumlighet bör tillsammans kunna ge en tydlig indikation om läckaget genom dammkroppen förändras. Turbiditetsmätningar ger klarast utslag då läckage uppträder punktformigt.

3.3.3. Spårämnesförsök

Vid regelbundna mätningar av naturligt förekommande spårämnen kommer ofta koncentrationen nedströms dammen att närma sig den som råder uppströms, om läckaget genom dammen ökar. Några naturligt förekommande spårämnen kan användas för kontinuerlig övervakning. Vid provtagning i många punkter och med korta mellanrum av ett på uppströmssidan tillsatt spårämne, kan dess spridning genom dammen bestämmas. Därigenom kan läckvattenflödets storlek och strömningshastighet bestämmas med relativt stor noggrannhet och zoner med läckage detekteras med god upplösning för ett visst tillfälle.

Metodbeskrivning

Två huvudtyper av spårämnesstudier kan genomföras vid dammundersökningar. Antingen kan naturligt förekommande spårämnen, såsom bakterier, alger och de stabila isotoperna

syre-18 och deuterium användas jämför Burgman et al. (1978) och Losjö, (1994), eller också kan olika ämnen tillföras artificiellt. Exempel på sådana ämnen kan vara färgämnen, glasbitar, radioaktiva isotoper och kemikalier såsom natriumbromid, jämför Williams (1986) och Plata (1991).

I ett större vattenmagasin är syre-18 och deuterium normalt i det närmaste konstanta. Isotopsammansättningen i nederbörden nedströms dammen kan däremot variera betydligt och är ofta av annan storleksordning. Även isotopsammansättningen i ett till nedströmsvattnet utläckande grundvattenmagasin kan vara markant olik den i magasinet. Hur stora isotopskillnaderna är beror bland annat på storleken på dammen och skillnaden i klimatförhållandena mellan dammens läge och platsen där huvuddelen av magasinetsvatten fallit som nederbörd. Om läckageflödet genom dammen ökar, kommer isotopsammansättningen nedströms dammen att närma sig magasinets.

Vad gäller artificiellt tillförda spårämnen måste dessa väljas med omsorg och anpassas till de förhållanden som råder vid den aktuella dammen. Bra översikter över denna spårämnes-teknik ges av bland andra Knutsson (1966). En viktig förutsättning för framgång med denna metod är att det tillförda ämnet får sådan koncentration att det klart kan separeras från bakgrundsvärdet i dammen och i övrigt vatten nedströms dammen. En fördel med ett rätt utfört spårämnesförsök med denna metod är att flödes hastigheten genom dammen kan bestämmas vid ett visst tillfälle. Försöket kan också upprepas vid olika tidpunkter. Däremot kan inte kontinuerliga mätningar utföras som ger ett mått på hur läckageflödet förändras.

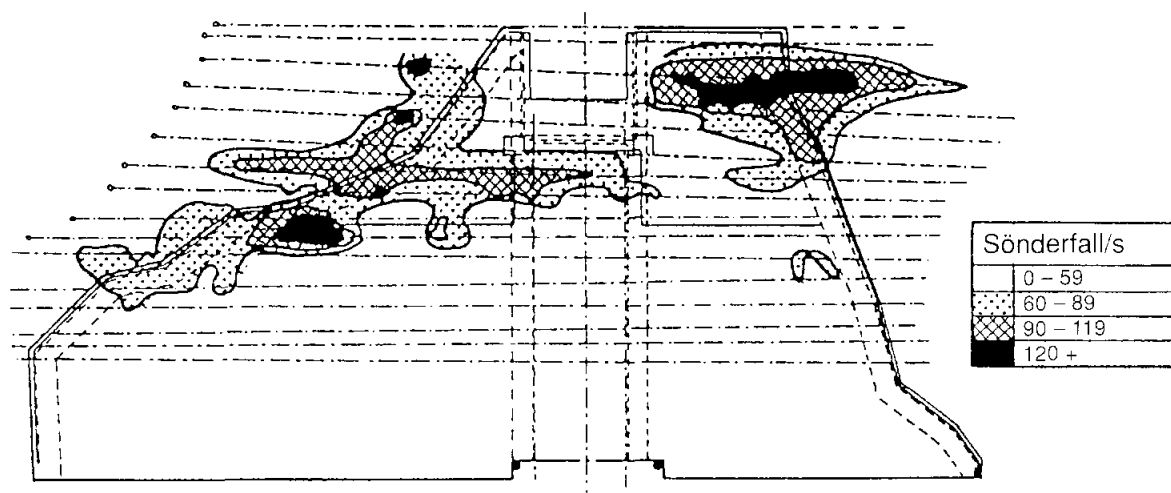
Spårämnen kan studeras i uppsamlat läckagevatten på samma sätt som den allmänna vattenkemin eller också kan man ta prover i borrhål i dammkroppen. Artificiellt tillsatta ämnen sprids vanligen ifrån borrhål i uppströmsdelen av fyllningsdammen. I vissa fall sprids ämnet i vattnet i magasinet och kommer sedan att koncentreras till läckagezonerna i dammkroppen.

Analysmetoden för spårämnen varierar naturligtvis beroende på vilket spårämne som valts. Prover insamlas dock övervägande för analys och sänds till lämpligt speciallaboratorium. Vissa spårämnen kan dock analyseras direkt i fält. Provtagningsintensiteten vid artificiella spårämnesförsök är oftast betydligt högre än vid studier av till exempel naturligt förekommande isotoper. De tidsberoende förändringarna är också snabbare vid transient tillförda koncentrationer.

Utvärderingsmetodik

Resultat jämförs från samtida mätningar i och nedströms dammen, på nederbörd och i de grundvattenmagasin som bedöms kunna läcka till yt- och grundvattnet nedströms dammen. En kvalitativ tolkning kan ofta göras enbart utifrån siffervärden eller genom studier av enkla grafer. En approximativ kvantitativ beräkning av andelen läckagevatten i vattnet nedströms dammen kan utföras med hjälp av enkla balans- och utspädningsekvationer. Vid artificiellt tillförda spårämnen kan förhållandet mellan tillförd koncentration och de koncentrationer som observerats i mätpunkterna utnyttjas bland annat för beräkningar av transporttider. Noggrannheten i beräkningarna beror främst på hur väl man känner sammansättningen och eventuella variationer i denna hos de olika vatten som blandas nedströms dammen och hur stora skillnaderna är mellan de olika vattentyperna. Vid tillförda spårämnen är skillnaden mellan bakgrundshalter samt tillförda och uppmätta koncentrationer av största betydelse. Är skillnaderna så små att analysnoggrannheten inverkar blir de kvantitativa beräkningarna i allmänhet mycket osäkra.

I figur 18 nedan visas ett exempel på resultat från spridning i vattenmagasinet av ett radioaktivt ämne, guld-198. Liknande undersökningar med hjälp av jod-131 har bland annat utförts av Guizerix, Molinari, Gaillard, Santos-Cottin, Mornas och Corda (1967).



Figur 18. Isoaktivitetskurvor för den radioaktiva isotopen guld-198 i Pedu Dam, Malaysia. Isotopen har spritts absorberad vid ett finkornigt pulver som långsamt sedimenterat, företrädesvis kring de partier i dammen där läckage förekommer. Figuren visar en planbild över radioaktiviteten mätt på dammens sidor och i borrhål en vecka efter spridningen. Efter Easey och Hanna (1985).

Potential och begränsningar

Den geometriska upplösningen i resultaten är i hög grad beroende av hur läckagevattnet kan samlas upp samt hur spårämnet kan mätas. För radioaktiva sediment som ansamlas vid läckagezoner i dammkroppen kan upplösningen bli mycket hög, upp till centimeter-noggrannhet. Många spårämnen måste dock samlas upp på liknande sätt som vid mätning av läckagevattnets kemiska sammansättning. Det innebär att i många fall kan endast provtagning ske från ett blandvatten, vilket speglar dammens totala läckagesituation. Om det finns möjlighet att analysera läckagevatten från olika sektioner av dammen eller borrhål ökar givetvis möjligheten att bestämma läget av ett eventuellt läckage.

Vid provtagning i många punkter och med korta mellanrum av ett tillsatt spårämne kan läckvattenflödets storlek och strömningshastighet bestämmas med god noggrannhet, varvid zoner med läckage kan detekteras med god upplösning. Nya spridnings-, mät- och provtagningsmetoder lämpliga för olika "nya" och "gamla" spårämnen utvecklas ständigt. De flesta spårämnen kan inte användas kontinuerligt. Radioaktiva spårämnen kan dock mätas utan avbrott men få av dem förekommer i tillräckligt höga koncentrationer i naturen. Tillförsel på artificiell väg kan i praktiken inte ske kontinuerligt beroende på de risker som finns vid hantering av radioaktiva ämnen.

3.4. Temperaturmätningar

Principen för temperaturmätning i dammar är att temperaturen i en given punkt i dammen påverkas av vattenströmningen genom dammen. Vid ökat läckage kommer temperaturvariationer att öka. Metoden kräver en längre tidsserie för att anomala förhållanden ska kunna konstateras. Temperaturmätningar kan användas både för övervakning och undersökning av dammar.

Allmänt

Temperaturen kan betraktas som ett spårämne som passerar genom dammen på liknande sätt som de ovan beskrivna spårämnena. Temperaturens transporthastighet (den termiska hastigheten) är dock långsammare än spårämnenas transporthastighet (vattnets porhastighet).

Temperaturmätningar ger en bild av vattenströmningen genom en fyllningsdamm. Genom regelbundna temperaturmätningar kan en kontinuerlig kontroll av vattenläckaget göras. Om en temperaturavvikelse konstateras jämfört med tidigare års mätningar kan den ofta härledas till en ökad vattengenomströmning. Mätningar utföres lämpligen i flera rör vilket möjliggör jämförelser av uppmätta temperaturer.

Metodbeskrivning

Kontinuerliga temperaturmätningar ger en bild av en damms normala temperaturförändringar under året. Temperaturförändringar, som överskrider de naturliga variationerna, indikerar en ökad vattenströmning. Resultatet kan användas för lokalisering av områden med förhöjt läckage samt för kvantifiering av läckageflödet.

Temperaturen i en damm beror främst av värmetransporten med läckagevattnet och värmeledningen i dammen, vilken bl a beror av vatten- och lufttemperaturen, jfr figur 19. Älvsvattnets lägsta månatliga medeltemperatur är normalt ca 0°C, medan de högsta månadsmedeltemperaturerna varierar mellan 15 och 20°C, med 1 à 2°C variation mellan åren. Temperaturvariationerna i älvsvattnet ger en temperaturpuls genom dammen med läckagevattnet. Vid stora läckageflöden erhålls en liten dämpning av temperaturpulsen samt en liten fäsförskjutning, dvs tidsförskjutning. Vid små läckageflöden blir dämpningen större.



Figur 19. Energiflödet i en fyllningsdamm.

Mätförfarande

Temperaturmätningar är enkla och kan utföras av personalen vid dammen. Mätutrustningen består av ett temperaturlod, vilket sänks ned i vattenståndsrör. Temperaturen mäts på fasta

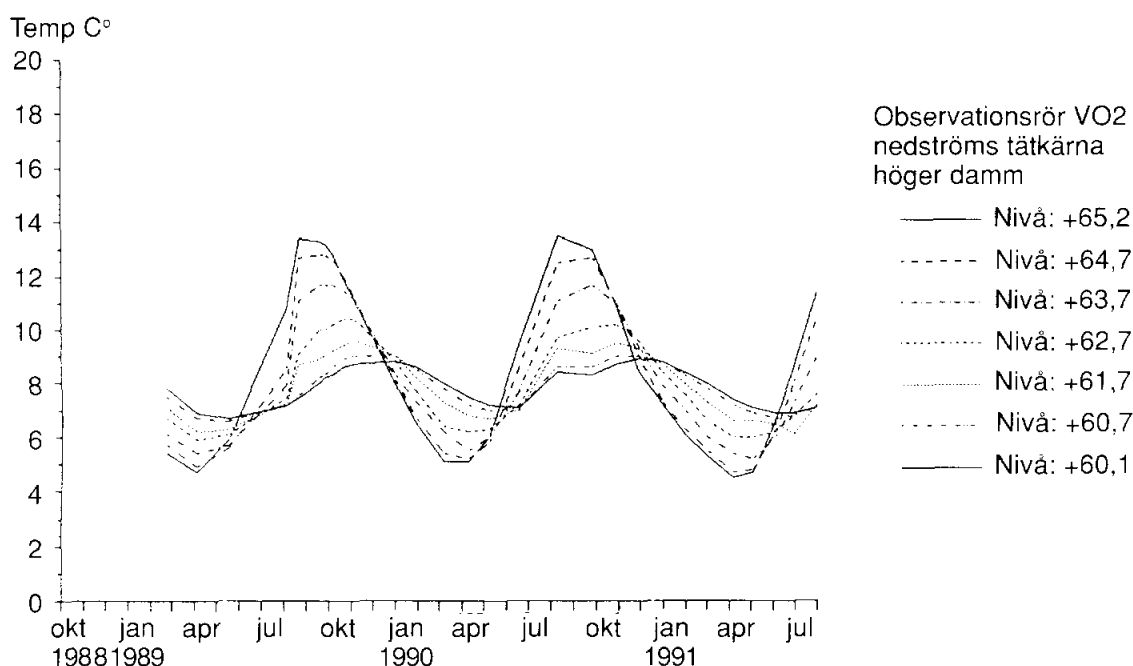
mättnivåer, med 1 – 2 m intervall i vertikalled, utmed rörens hela längd under grundvattenytan. Rören bör helst gå ner till berg, så att dammens hela höjd kan kontrolleras. Avståndet mellan rören bestäms av dammens utformning och undersökningens syfte. Varje rör kan anses representera ett någon till några meter brett avsnitt av dammen. Mätningar bör utföras både på dammens uppströms- och nedströmssida. Mätfrekvensen bestäms med utgångspunkt från undersökningens syfte och tex variation av magasinsnivå. Den upplösning som fås då mätningarna utförs en gång per månad är tillräcklig för att få en sammanhängande temperaturkurva under året. I fall då övervakningsbehovet bedöms vara stort kan det vara motiverat att installera fasta temperaturgivare. Mätningarna blir därmed mer detaljerade, varför tolkningsmöjligheterna blir bättre.

Utvärdering

Kvalitativa resultat kan erhållas genom tolkning av uppritade mätvärden, se figur 20. Tolkningen kan utföras antingen genom temperaturjämförelser mellan olika mätpunkter eller genom jämförelser av temperaturförloppet i enstaka mätrör under en längre tidsperiod. Metodens noggrannhet beror även av hur väl man följer älvvattnets och luftens temperaturvariationer.

För kvantitativa bedömningar bör numeriska modeller användas. En tydlig förändring av temperaturvariationerna erhålls teoretiskt sett när tät kärnans hydrauliska konduktivitet överstiger ca $5 \cdot 10^{-7}$ m/s, Johansson (1990). Genom analys av mätdata kan läckageflöde och hydraulisk konduktivitet bestämmas approximativt. Noggrannheten bedöms vara bättre än ca en halv tiopotens.

Temperaturmätningar kan utvärderas på samma sätt som spårämnesförsök. Fördelen framför dessa metoder är att porositeten ej behöver vara känd vid beräkning av strömningshastigheten. De termiska materialegenskaper som tillkommer kan också bestämmas med högre noggrannhet än porositeten varför det erhållna resultatet därmed kan bli bättre genom analys av temperaturmätningar.



Figur 20. Temperaturvariationer i ett vattenståndsrör på bestämda nivåer.

Potential och begränsningar

Med temperaturmätningar kan förändringar i läckageflödets storlek genom en fyllningsdamm detekteras och lokaliseras i ett tidigt skede. Metoden ger god noggrannhet och upplösning oavsett skadestorlek. Temperaturmätningar är ett bra komplement till konventionella metoder för mätning av läckageflödet genom en damm. Metoden är lämplig främst i övervakningsskedet, speciellt i de fall då uppsamling av läckagevatten inte kan utföras, exempelvis då nedströmsvattenytan ansluter till dammens nedströmssida. Det bör dock påpekas att metoden liksom övriga borrhålsmetoder endast ger information i området närmast mätpunkterna. Vid kraftigt förhöjd vattenströmning i ett "rör" (dvs en punktformig skada) blir temperaturpåverkan tydlig inom ett några meter stort område.

Termografiska mätningar

Ytemperaturer på dammen kan också mätas med infraröda kameror placerade i flygplan eller fast monterade nedströms dammen, sk termografiska mätningar. I Tyskland har mätningar med denna metod använts speciellt vid låga invallningsdammar, jfr Merkler et al (1989). Mättekniken är principiellt intressant även om den har flera begränsningar i vårt klimat.

4. BEDÖMNING AV MÄTMETODER

4.1. Allmänt

De beskrivna metoderna för övervakning och tillståndskontroll har varierande lämplighet för detektering av skador i fyllningsdammar. En del metoder är särskilt lämpliga för kontinuerlig övervakning medan andra endast kan användas vid enstaka mättillfällen. För att kunna jämföra och värdera de olika metodernas lämplighet inför en viss typ av undersökning har nedanstående tabeller sammanställts. Motiven för de bedömningar som gjorts återfinns under respektive metodbeskrivning i föregående kapitel.

Denna översiktliga utvärdering är främst avsedd för den som snabbt vill få en överblick över vilka metoder som är mest lämpliga vid en viss problemställning och för en viss typ av dammundersökning. De aspekter som medtagits i jämförelsen har bedömts vara av betydelse, men de är ej fullständiga eftersom dammarnas undersökningsbehov är unika. Jämförelsen nedan gör därför inte anspråk på att vara heltäckande men förhoppningsvis kan den ändå vara ett hjälpmedel vid val av lämplig undersökningsmetod. Jämförelsen blir således generell och måste därför användas med försiktighet.

Flertalet metoder kan användas både för enstaka mätningar i en fyllningsdamm och för kontinuerliga mätningar, vilket anges i tabellerna. På samma sätt har också metoder som med rimlig arbetsinsats kan utvärderas i 3 dimensioner angivits, liksom metoder som bedömts kunna utvecklas väsentligt för dammtillämpningar inom de närmaste 10 à 20 åren.

Vissa metoder, t ex temperaturmätningar och gammasonder, fordrar borrhåringar medan andra, såsom flödesmätning, sker från fasta installationer. Metoder som georadar och självpotential kan utföras från markytan utan att några ingrepp i dammkroppen behöver göras (sk icke förstörande metoder eller Non-Destructive-Testing, NDT). Det finns också metoder som kan användas både från ytan och i borrhål. Generellt medför detta att detaljeringsgraden blir bättre. Vid nedanstående jämförelser har därför metoderna uppdelats i borrhålsmetoder, NDT-metoder och övriga metoder.

4.2. Parametersamband vid inre erosion

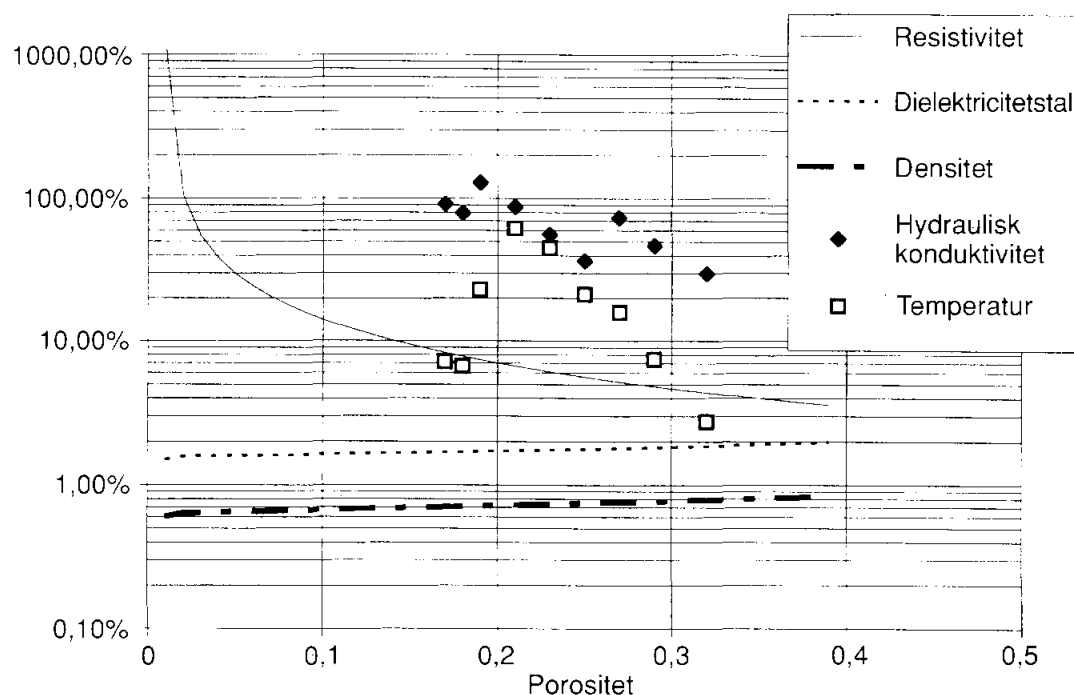
I kapitel 2 visades att inre erosion är en process som har avgörande betydelse för dammars säkerhet. En utvärderingsmodell har därför framtagits där olika metoders lämplighet för att registrera inre erosion kan jämföras.

Den primära effekten av inre erosion är borttransport av finmaterial. Detta medför ökad porositet och permeabilitet samt ökat flöde. Den ökade porositeten medför också lägre densitet, högre vattenkvot och därmed förändrade elektriska och elektromagnetiska egenskaper, jfr kapitel 3. Det ökade flödet medför t ex större temperaturvariationer och ökad självpotential. Inre erosion ger alltså upphov både till förändring av **materialegenskaper** och **strömningsegenskaper**, jfr nedan.

Inre erosion är en fortgående långsam process vilken dock kan ha ett accelererande förlopp. På sikt kan inre erosion resultera i en skada eller alternativt återställande genom självläkning. Önskvärt är att kunna registrera förändringar av porositeten i ett så tidigt skede som

möjligt. Detta möjliggör framtagning av prognoser, vilka skulle kunna vara användbara vid t ex dammsäkerhetsutvärderingar.

Till viss del kan olika mätbara parametrar relateras till varierande porositet i en godtycklig punkt. I Figur 21 visas principiellt hur känsliga några olika parametrar är för en förändring av porositeten med 1%-enhet. En sådan liten förändring har i sig en liten inverkan på dammens säkerhet och ska därför ej likställas med en skada i dammen. För vissa av parametrarna finns direkta samband med porositeten medan sambandet för andra parametrar måste beräknas med hjälp av flera olika samband. Noggrannheten i de redovisade sambanden är därför ej likvärdig varför figuren bör tolkas kvalitativt. Hur figuren framtagits redovisas i Bilaga 1. Tyvärr kan jämförelser ej göras mellan alla parametrar eftersom dessas samband med porositetsförändringar ej är kända.



Figur 21. Olika mätparametrars relativa förändring vid förändring av porositeten med en procentenhet. Materialberoende parametersamband visas med linjer medan strömningsberoende visas som diskreta punkter.

Som framgår av figur 21 är förändringar av hydraulisk konduktivitet och därmed flödesmätningar känsligast vid studium av en enstaka punkt. Inom porositetsintervallet 0.2 à 0.3 är också temperaturmätningar känsliga. Eftersom de relativa förändringarna är stora kan mätningar av dessa parameter därför utföras med god **noggrannhet** även om mättekniken är enkel. Att mäta densiteten för att bestämma porositeten fordrar däremot en hög noggrannhet eftersom den relativa förändringen är liten. De flödesrelaterade parametrarna (hydraulisk konduktivitet och temperatur) ger generellt ett betydligt större utslag än de parametrar som är beroende av förändringar i materialet beroende på ändrade proportioner mellan vatten och fast material (resistivitet, dielektricitetsstal och densitet). Förändringen av de flödesberoende parametrarna är omkring 100%, vilket innebär en fördubbling/halvering av ursprungligt mätvärde vid en förändring av porositeten med 1%-enhet.

Dessvärre är parametrarna i figuren ovan ej enbart beroende av porositeten utan även kopplade till varandra. Som exempel kan nämnas att flera av parametrarna är temperaturberoende, t ex resistivitet och flöde. De kopplade sambanden kan i vissa fall ge en förstärkning av känsligheten, medan sambanden i vissa fall kan försvåra tolkningen av resultaten.

Ovanstående resonemang är förenklat och beaktar ej hur stor **upplösning** som krävs och ej heller de olika parametrarnas normala variationer i en damm. Det går därför inte att dra några definitiva slutsatser utgående från resonemanget ovan, om vilken parameter som är lämpligast. Detta kan illustreras med följande förenklade exempel.

Flödet genom en damm med arean 10 000 m² (500 m lång och 20 m hög) samlas upp i ett dränagesystem. Läckageflödet, q_0 (m³/sm²) mätes med en noggrannhet av 2 %. I en zon av dammen (antag 2 m²) ändras porositeten 1%-enhet vilket ger en fördubbling (100 %-ig ökning) av läckageflödet, jfr figur 21. Läckageflödet, q_1 , blir då:

$$q_1 = ((10\,000 - 2)q_0 + 2 \cdot 2q_0) / 10\,000 = 1,0002\, q_0$$

Läckageflödet ökar således med 0,02 % vilket är 100 gånger lägre än den antagna mätnoggrannheten 2 %. Små porositetsförändringar är därför svåra att konstatera genom flödesmätningar. Den undre gränsen för flödesmätningar med angiven mätnoggrannhet blir i detta fall ca 6 à 7 %-enheters förändring av porositeten på en area av 1 m². Härvid har antagits en fördubbling (100% förändring) av flödet per procentenhets förändring av porositeten, jfr figur 21. Samma förändring kan också fås om porositetsförändringen (1%-enhet) uppkommer på en area av ca 100 m².

Detta exempel är måhända förenklat, men det belyser ändå mätproblemet, samt att både noggrannhet och upplösning måste beaktas vid val av metod. Resultatet ska dock inte tolkas som att flödesmätningar är olämpliga vilket framgår av kapitel 5 nedan. Däremot visar exemplet att mätresultaten från flödesmätningar, liksom från andra metoder, bör tolkas med försiktighet och med beaktande av respektive metods förutsättningar.

4.3. Utvärderingsmetodik

Eftersom ”nya” metoder ej kan utvärderas genom erfarenheter har en utvärderingsmodell framtagits. Av ovanstående exempel vid studium av inre erosion framgår att metodernas användningsområde kan beskrivas genom bedömningar av metodernas noggrannhet och upplösning. Likaså har metodernas känslighet för variation av materialegenskaper respektive strömningsegenskaper betydelse. Utgående från dessa faktorer har en utvärderingsmodell framtagits. Det bör påpekas att de generaliseringar som ligger till grund för utvärderingsmodellen inte alltid är giltiga. Likaså har varje metod sin nisch och kan i de flesta fall ej ersättas med andra metoder. Modellen bör därför användas med viss försiktighet och med syfte att utgöra viss vägledning i val av undersökningsmetod.

Metoderna har bedömts med avseende på fem faktorer:

N = metodens mätNoggrannhet

U = metodens möjlighet till geometrisk Upplösning

M = metodens känslighet för variation i **M**aterialsammansättning

F = metodens beroende av vatten**F**lödet genom dammen

H = metodens beroende av vattnets **H**astighet

En gradering i en skala 0 – 3 poäng har använts där 3 är bäst eller betecknar det största beroendet. Bedömningar har gjorts för de tre olika skadetyperna punktform, plan och diffus, samt därav beräknade medelvärden, jfr Bilaga 2. I nedanstående avsnitt redovisas sammanställningar av dessa bedömningar där metoderna klassats som:

- olämplig (mindre än 0,5 poäng)
- möjlig (mellan 0,5 och 1,25 poäng)
- lämplig (mellan 1,25 och 1,75 poäng)
- mycket lämplig (över 1,75 poäng)

På samma sätt har metodernas strömnings- respektive materialberoende bedömts som:

- obetydligt (mindre än 0,5 poäng)
- mätbart (mellan 0,5 och 1,5 poäng)
- tydligt (mellan 1,5 och 2,0 poäng)
- mycket tydligt (över 2,0 poäng)

4.4. Borrhålsmetoder

Flertalet geotekniska borrhålsmetoder är etablerad teknik där lång erfarenhet har erhållits rörande tolkning och utvärdering. Varje metod har sin nisch och metoderna kompletterar varandra. Dessa metoders användningsområde är kända och deras användningsområde kan bedömas utifrån erfarenheter, varför de ej medtagits i nedanstående utvärdering.

Vid jämförelser mellan olika borrhålsmetoder visar dock erfarenheterna att avvikelser mellan resultaten ofta förekommer. Detta beror förmodligen på att detaljeringsgraden är hög i mätningarna samtidigt som variationerna lokalt i dammkroppen kan vara stora. Följden blir svårigheter att få en helhetsbild av förhållandena i dammen. Normalt krävs därför ett flertal borrhål för att få tillräcklig information. Generellt ger dock borrhålsmetoder god upplösning och hög noggrannhet i det undersökta området.

BORRHÅLS-METODER	LÄMPLIGHET FÖR DAMM-UNDERSÖKNING	MATERIAL-BEROENDE	STRÖMNINGS-BEROENDE
Borrhålsradar	Mycket lämplig	Mycket tydligt	Obetydligt
Sonic Cross-hole	Lämplig	Mycket tydligt	Obetydligt
Spårämne	Mycket lämplig	Obetydligt	Mycket tydligt
Gamma loggning	Möjlig	Mätbart	Obetydligt
Neutron loggning	Möjlig	Mätbart	Obetydligt
Temperatur	Mycket lämplig	Obetydligt	Mycket tydligt

Bland dessa metoder är det främst borrhålsradar, spårämne och temperaturmätning som bedöms kunna ge hög noggrannhet och upplösning vid detektion av strukturella förändringar i dammkroppen. Detaljerade spårämneshörsök och temperaturmätningar är de bästa metoderna för att upptäcka ändrade flöden och strömningshastigheter hos läckvattnet. Dessa metoder har också relativt stor utvecklingspotential liksom borrhålsradar och Sonic Cross-hole.

Av borrhålsmetoderna är främst temperaturmätningar lämpliga för kontinuerlig övervakning. Utvärdering i tre dimensioner kan erhållas genom mätningar med borrhålsradar och Sonic Cross-hole.

BORRHÅLS-METODER	KONTINUERLIG MÄTNING	UTVÄRDERING I 3 DIMENSIONER	UTVECKLINGSPOTENTIAL
Borrhålsradar	Nej	Ja	Ja
Sonic Cross-hole	Nej	Ja	Ja
Spårämne	Tveksamt	Nej	Ja
Gamma loggning	Nej	Nej	Viss
Neutron loggning	Nej	Nej	Viss
Temperatur	Ja	Nej	Ja

4.5. Icke förstörande metoder

Flertalet icke förstörande metoder är relativt nya i dammundersökningssammanhang. De flesta som finns med i nedanstående tabell innebär geofysiska mätningar från dammkroppens överyta. Därigenom blir detaljeringsgraden och upplösningen i allmänhet sämre än för borrhålsmetoder, men i gengäld kan ofta en god helhetsbild av förhållandena i fyllningsdammen erhållas. Generellt gäller att resultatet blir avsevärt bättre om kalibrering kan ske med borrhålsmetoder eller andra metoder.

Bland de icke förstörande metoderna bedöms reflektionsseismik, ekolod, georadar, självpotential och resistivitet kunna ge en relativt god noggrannhet och upplösning. Med undantag av självpotentialmetoden och till viss del resistivitetsmetoden är NDT-metoderna materialberoende. Självpotential och resistivitet är de metoder som lämpar sig bäst för kontinuerlig övervakning. Båda är robusta och kan installeras i fält för insamling av data.

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

NDT-metoderna har generellt en förhållandevis stor utvecklingspotential, särskilt ekolodstekniken som fortfarande befinner sig på utvecklingsstadiet. Självpotentialmetoden är speciellt intressant eftersom den är känslig för ändrade flöden och strömningshastigheter hos läckvattnet. Det är dock osäkert hur kraftiga dessa samband är.

Utvärdering i tre dimensioner kan utföras med ekolod, georadar, självpotential och resistivitet.

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

4.6. Övriga metoder

De övriga metoderna utgörs främst av olika former av mätningar av läckagevattnets sammansättning och flöde. Dessa metoders geometriska upplösning av en förändring i dammkroppen är i allmänhet dålig, främst beroende på att läckagevattnet endast uppsamlas för fyllningsdammen som helhet. Om provtagning och uppsamling av vattnet kan göras mera detaljerad kan också dessa metoders upplösning förbättras.

ÖVRIGA METODER	LÄMPLIGHET FÖR DAMM-UNDERSÖKNING	MATERIAL-BEROENDE	STRÖMNINGS-BEROENDE
Läckljud	Lämplig	Obetydligt	Mätbart
Spårämne	Lämplig	Obetydligt	Tydligt
Hydrokemisk analys	Lämplig	Obetydligt	Mycket tydligt
Turbiditetstest	Lämplig	Obetydligt	Tydligt

Spårämnesundersökning utan borrhål, hydrokemisk analys, turbiditetstest och läckagemätning är naturligt nog bland de bästa metoderna för att upptäcka förändringar i läckagevattnets flöde och strömningshastighet. I dagsläget bedöms inte läckljudsmätningar ge lika goda resultat som de ovan nämnda metoderna, men utveckling av denna typ av undersökningar kan komma att göra metoden intressant vid dammundersökningar i framtiden. De "övriga metoderna" kan i allmänhet installeras på dammkroppen för kontinuerlig mätning. Likaså är utvecklingspotentialen god. Ingen metod möjliggör dock utvärdering i tre dimensioner.

ÖVRIGA METODER	KONTINUERLIG MÄTNING	UTVÄRDERING I 3 DIMENSIONER	UTVECKLINGS-POTENTIAL
Läckljud	Ja	Nej	Viss
Spårämne	Ja	Nej	Viss
Hydrokemisk analys	Ja	Nej	Ja
Turbiditetstest	Ja	Nej	Viss

5. METODER FÖR KONTINUERLIG ÖVERVAKNING

5.1. Mätproblem och systemkrav

För övervakning gäller generellt att iaktta, analysera och dokumentera. En engagerad och medveten driftspersonal som dokumenterar händelser är därför av stort värde. Dokumentation av små, för sig själva kanske obetydliga händelser kan i ett senare sammanhang visa sig vara värdefulla. Därför är det angeläget att det finns rutiner för varje damm som möjliggör att man vid ett senare tillfälle kan studera vad som tidigare har hänt med dammen.

Vid övervakning önskas information om både korttids- och långtidsförändringar. Ofta sker övervakning av dammar genom någon form av flödesmätning. Flödesmätningar har visat sig vara värdefulla och har bidragit till upptäckter av flera rapporterade dammincidenter. Att flödesmätningar används är naturligt eftersom läckaget genom dammen är ett mått på dammens genomsläpplighet. Som visats i ovanstående kapitel är dock inte upplösningen så hög vid flödesmätningar, varför dessa ger utslag först i ett relativt sent skede av en pågående förändring i dammen. Detta medför att metoder som är mer känsliga för flödesförändringar skulle kunna vara ett bra komplement.

Av de uppsatta skadetyperna (punkt, plan och diffus) bedöms alla vara lika betydelsefulla vid övervakning. Dessutom bör metoderna vara känsliga för förändring av vattenströmningen genom dammen.

Övervakning av dammar bör göras med metoder som har hög driftsäkerhet samt är känsliga för förändringar av mätvariablerna, företrädesvis de strömningsberoende. Mätssystemen 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; exempelvis vattenstånd i magasinet, termisk påverkan (tex nedfrysning och rörelser), tung trafik etc.

5.2. Mätmetoder

Av NDT-metoderna är det främst självpotentialmätningar (SP) och resistivitetsmätningar som bedöms vara lämpliga. SP-metodens känslighet bedöms vara tillräcklig för att i ett tidigt skede kunna registrera förändringar i dammen. Mätningar med dessa båda metoder utförs för närvarande vid Sourva (Östra dammen), inom ett av Elforsk delvis finansierat projekt.

Även resistivitetsmätningar bör kunna användas trots att dessa primärt ger utslag på en förändring av materialets egenskaper. Generellt gäller dock att då flödet ökar i ett visst område i dammen ökar där även temperaturvariationerna under året. Eftersom även resistiviteten är temperaturberoende innebär det att resistivitetsmätningar torde kunna användas för lokalisering av områden med förhöjt flöde. Vid långtidsmätningar skulle därmed förändringar kunna upptäckas. Preliminära beräkningar har visat att mätnoggrannheten är tillräcklig för att detektera förändringar som medför en temperaturpåverkan av $\pm 3^{\circ}\text{C}$ i ett ca 10 m^2 stort område. För att undersöka denna metods möjligheter har Elforsk finansierat ett projekt som omfattar mätningar i dammarna i Lövön och Moforsen.

Bland borrhålsmetoderna bedöms temperaturmätningar kunna uppfylla kriterierna. Metoden har hög noggrannhet men fordrar många borrhål för att kunna täcka hela dammen. Metoden bör därför företrädesvis användas i sektioner där utökad övervakning önskas. Eftersom metoden baseras på temperaturens årstidsvariationer krävs dock några års mätningar för att små förändringar skall kunna upptäckas.

Bland de metoder som erfordrar fasta installationer bedöms flödesmätningar vara lämpligast. Helst bör läckagevattnet från dammen insamlas sektionsvis. Även läckljudsmätningar kan vara lämpliga som komplement eftersom de också möjliggör viss lokalisering av läckagepunkten. Vid fasta installationer för flödesmätningar kan vid behov också installeras utrustning för turbiditetsmätning och hydrokemisk analys.

Ovan nämnda metoder möjliggör en tidigare indikation vid vissa förändringar i en damm jämfört med exempelvis mätningar av deformationer (sättningar). Sådana mätningar ger dock värdefull information om långtidsförändringar i dammen varför de därför inte kan ersättas med de ovan nämnda nya metoderna. Likaså bedöms SP, resistivitet och temperaturmätningar kunna ge en tidigare indikation om en pågående förändring i dammen än flödesmätningar, men de kan inte ersätta flödesmätningar.

5.3. Instrumentering

Av de ovan föreslagna nya metoderna: självpotential, resistivitesmätningar, temperaturmätningar, turbiditetsmätningar och hydrokemisk analys, 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.

6. METODER FÖR UNDERSÖKNING AV BEFINTLIG ÖVERDÄMNINGSFÖRMÅGA

6.1. Mätproblem

För att kunna bedöma en damms överdämningsförmåga måste man utgå från de data som erhållits vid den normala övervakningen av dammen. Av dessa data kan framgå hur dammen har reagerat vid olika lastförhållanden samt hur dammens egenskaper förändrats med tiden. Utöver en sådan analys erfordras ytterligare information för att bedöma de tillkommande riskerna för skador som kan uppkomma vid en eventuell överdämning. I många fall måste också tåtkärnans verkliga nivå bestämmas. Därefter kan dammens förmåga till överdämning utvärderas. Vid en första analys kanske det är tillräckligt att anta att på ritningar angiven tåtkärnenivå överensstämmer med nuvarande förhållanden, alternativt kan en kontroll göras i någon enstaka punkt, t ex genom provgroppsgrävning. Omfattningen av undersökningen kan därför variera och bestäms av främst av konsekvenser vid dammbrott samt överdämningens storlek. De skaderisker som kan uppkomma i samband med överdämning är:

- Ytlig erosion vid dammens uppströmsslänt och krön
- Läckage och inre erosion i dammkrönet (filter- och tåtkärnematerial)
- Inre erosion i dammkroppen eller undergrunden
- Erosion vid dammtån
- Försämrade stabilitet av nedströmsslänten.

De tillkommande undersökningsbehoven jämfört med övervakning blir då undersökning av benägenheten för yttre och inre erosion, samt bestämning av tåtkärnans krön.

6.2. Mätmetoder

För undersökning av ovan beskrivna problemområden synes befintliga metoder ge tillräcklig information. Bedömning av risker för skador som kan uppstå på dammens ytor erfordrar inga direkta mätningar utan bedömningen kan göras genom okulär besiktning. Förändringar som kan ge upphov till skador som kan relateras till inre erosion i dammkrönet bestäms av egenskaperna (främst kornfördelning) hos materialet i tåtkärnan och filtren. Dessa egenskaper kan endast punktvis bestämmas genom analys av prover från borrhinar eller provgroppar. För att få en helhetsbild över potentiella riskområden i dammen kan dock viss komplettering erfordras genom utökad övervakning med någon av de metoder som beskrivs i kapitel 5.

Som komplement till konventionella undersökningar kan mätningar med georadar utföras för att bestämma tåtkärnans nivå kontinuerligt längs dammen, jfr Johansson et al (1991). Vid gynnsamma förhållanden kan noggrannheten bli bättre än ± 5 cm vid normala undersökningsdjup. Vid större undersökningsdjup samt vid ogynnsamma förhållanden (exempelvis kraftiga stenlager eller dåligt vattenmättad tåtkärneyta) försämras noggrannheten. I flertalet mätsituationer bör dock noggrannheten kunna bli bättre än ± 10 cm. Mätresultatet kan dock alltid användas för att lokalisera lågpunkter, för senare nivåbestämning.

7. METODER FÖR INCIDENTUNDERSÖKNINGAR

7.1. Mätproblem

Som beskrivits tidigare i avsnitt 2.2 utförs incidentundersökningar oftast med syfte att bedöma eventuella konsekvenser av en konstaterad förändring. Ibland tillkommer dock att först lokalisera området där en förändring inträffat. Beroende på vald övervakningsnivå varierar behovet av lokalisering vid en incident från fall till fall. Vid hög övervakningsnivå (exempelvis med årliga eller glesare mätningar med någon eller några av metoderna nedan) ges bättre möjligheter att registrera en pågående förändring genom jämförelser med tidigare insamlade data. Därmed minskas också undersökningsbehovet vid en incident.

Då förändringens läge skall fastställas behöver ofta en större del av dammen undersökas, såvida inte förändringen framgår på dammens yta exempelvis ett sjunkhål. För detta ändamål lämpliga metoder bör därför vara snabba och kunna ge en helhetsbild av dammen. Då förändringens läge har fastställts krävs däremot högre noggrannhet och upplösning för att bedöma skadans omfattning och betydelse.

7.2. Lokalisering av förändringar

Vid lokalisering av förändringar kan samma krav ställas som vid övervakning av dammar, dvs att metoderna ska ge en god bild av dammens allmänna tillstånd samt vara känsliga för variationer av flödet genom dammen. Till skillnad mot metoder som används vid övervakning måste dock metoderna kunna ge ett snabbt svar, dvs påbörjande av kontinuerliga mätningar på årsbasis är inte intressanta. För lokalisering av skador bör metoder användas som ger en så heltäckande bild av dammen som möjligt. Borrhålsmetoder är därför mindre lämpliga för detta ändamål.

SP-mätningar kan utföras snabbt och ger också ett snabbt resultat, varför det förmodligen är den lämpligaste metoden. Lämpliga metoder är även resistivitetsmätning och georadar eftersom dessa enkelt kan utföras utmed dammen utan några störande ingrepp.

Reflektionsseismik är en metod som på sikt bedöms kunna användas för detta ändamål. I vissa fall kan också refraktionsseismik ge viss information.

7.3. Konsekvenser av förändringar

Då förändringarna ofta kan vara små bör metoder med hög upplösning väljas och deras material- respektive flödesberoende egenskaper är i detta fall inte lika viktiga. Eftersom undersökningsområdet efter den inledande lokaliseringen dessutom är begränsat blir borrhålsmetoderna möjliga att använda, t ex borrhålsradar, temperatur och Sonic Cross-hole.

Traditionellt används borrhoring och/eller sondering för att undersöka konsekvenserna av en förändring. Genom sonderingsresultat, analys av jordprover etc fås därvid en bild av skadans utbredning. Förmodligen kommer borrhoring inte att kunna ersättas med "nya" metoder. Dess informationsgrad kan dock ökas genom att i ökad utsträckning installera mätrör som kan användas även för andra mätningar. Om möjligt bör plaströr installeras eftersom metallrör ej kan användas vid mätningar med borrhålsradar.

7.4. **Praktikfall**

I flera av referenserna finns beskrivet hur man gått tillväga vid incidentundersökningar. Två nyligen rapporterade fall bifogas, jfr Bilaga 3 och 4.

I Uljua dammen i Finland upptäcktes en skada i maj 1990. Ett omfattande undersökningsprogram startade omedelbart. Följande metoder användes:

- Resistivitet
- Refraktionsseismik
- Spårämnesförsök (hydrokemisk och bakteriologisk analys av läckagvatten)
- Stötvågsmätningar
- Georadar
- Gammaloggning
- Visuell inspektion av dykare

Sammanfattningsvis kan konstateras att de geofysiska mätningarna gav värdefull information och förståelse för skadans uppkomst och omfattning.

Peruca-dammen i Kroatien utsattes för ett attentat i januari 1993. Attentatet medförde skador på dammen men ledde ej till dammbrott. För att utröna skadornas omfattning har följande undersökningar utförts:

- Refraktionsseismik
- Självpotential
- Spårämnesförsök
- Temperaturmätningar i magasinet
- Resistivitetsmätningar

Genom mätningarna har viss indikation om skadornas utsträckning erhållits. För att få ytterligare information planeras följande mätningar:

- Borrningar med gammaloggning, densitetsloggning och seismisk tomografi
- Kompletterande refraktionsseismik och självpotentialmätningar

8. SLUTSATSER

Denna studie beskriver hur nya metoder kan användas för att följa de tidsberoende förändringarna i dammarna samt de förändringar som kan uppkomma i samband med de högre vattenstånd som kan erhållas vid eventuella tillfälliga överdämningar vid de dimensionerande flöden som anges i Flödeskommittens riktlinjer. För både övervakning och undersökning av dammar finns idag nya metoder som är eller kan bli bra komplement till befintliga metoder. De nya metoderna kan dock ej ersätta de hittills använda metoderna. Den erfarenhet som erhållits med beprövade metoder är värdefull, varför pågående mätningar ej bör avslutas och ersättas med nya metoder.

De beskrivna metoderna för övervakning och tillståndskontroll har varierande lämplighet för detektering av skador i fyllningsdammar. En del metoder är särskilt lämpliga för kontinuerlig övervakning medan andra endast kan användas vid enstaka mättillfällen. För att kunna jämföra och värdera de olika metodernas lämplighet inför en viss typ av undersökning har en utvärderingsmodell framtagits. Genom studium av uppkomsten av inre erosion har visats att strömningsrelaterade mätparametrar ger större mätbara förändringar än materialrelaterade mätparametrar. Metodernas användningsområde bestäms också av deras noggrannhet och upplösning.

För övervakning bedöms självpotentialmätningar (SP), resistivitetmätningar och temperaturmätningar vara lämpligast för komplettering av befintliga metoder. Metodernas noggrannhet och upplösning är sådana att förändringar i dammen kan registreras i ett tidigare skede än vad som är möjligt med nuvarande övervakningsmetoder. De förstnämnda metoderna kan utföras från dammkrönet och kan därmed täcka in hela dammens längd. Temperaturmätningar utföres i borrhål och ger därför endast diskontinuerlig information. Temperaturmetoden baseras på temperatursensitivitetens årstidsvariationer och kräver helst ett års mätningar för att små förändringar skall kunna upptäckas.

Övervakning kan också ske med turbiditetsmätningar samt hydrokemisk analys av läckagevattnet. I framtiden bedöms även att läckljudsmätningar ska kunna bli användbara som komplement till övriga mätningar. Alla de här beskrivna metoderna kan installeras permanent i en damm och anslutas till en mät dator, där lagring och bearbetning kan ske av insamlade data.

För undersökning av en damms överdämningsförmåga ger befintliga metoder i allmänhet tillräcklig information. Om man önskar att bestämma tät kärnans nivå kontinuerligt längs dammen kan dock georadar användas.

Vid incidentundersökningar kan först erfordras att förändringen lokaliseras. För detta ändamål förefaller SP-mätningar vara den lämpligaste metoden eftersom den kan utföras snabbt. Metoden har dock bara använts en gång i Sverige inom ett utvecklingsprojekt. Lämpliga metoder är även resistivitetmätning och georadar eftersom dessa enkelt kan utföras utmed dammen utan några störande ingrepp. Reflektionsseismik är en metod som på sikt bedöms kunna användas för detta ändamål. Om mätningar med något eller några års intervall utföres med någon eller några av först nämnda metoderna (SP, resistivitet och georadar) underlättas tolkningen vid en incidentundersökning.

Då en förändring lokaliserats kan metoder med hög upplösning väljas för att undersöka dess konsekvenser. Bland dessa metoder kan nämnas borrhålsradar och Sonic Cross-hole. I vissa fall kan också enstaka temperaturmätningar ge viss information. Traditionellt används borrar och/eller sondering för detta ändamål och förmodligen kommer borrar inte att kunna ersättas med "nya" metoder. Borrararnas informationsgrad kan dock ökas genom installation av mätrör som kan användas för andra mätningar. Om så är möjligt bör plaströr väljas eftersom dessa erfordras vid mätningar med borrhålsradar.

9. REFERENSER

ABEM AB, Produktblad *ABEM WADI*

The Finnish Geotechnical Society (1992), *Ground penetrating radar, geophysical research methods*, The Finnish Building Centre Ltd, 64p

GEONICS LIMITED, Produktblad *Geophysical Instrumentation*

GEONICS (1992), *Groundwater Environmental Geotechnical and Buried Hazardous Waste Detection*, Ontario, Canada, 88p

ICOLD (1984), *Detoriation of dams and reservoirs. Answer to Inquires on Detoriation*.

ICOLD (1982), *Automated observation for the safety control of dams*, Bulletin 41, 120p

Vattenfall (1988), *Jord- och stenfyllningsdammar*, Stockholm, 242 s

Andersson, P. et al (1992), *Undersökning av fyllningsdammar med radar och utspädnings-sond*, Report No. 58 Inst. för vattenbyggnad KTH, Stockholm, 107 s.

Armbruster, H. von & Merkle, G.P. (1982), *Möglichkeiten der Leckstellenortung an Erddämmen*, Geotechik, vol. 5, pp 14-22.

Bertin, J. & Loeb, J. (1976), *Experimental and Theoretical Aspects of Induced Polarization*, vol. 1 & 2, Gebrüder Bornträger, Berlin, 335p.

Black, W.E. & Corwin, R.F (1984), *Application of Self-Potential Measurements to the Delineation of Groundwater Seepage in Earth-Fill Embankments*, Soc. Expl. Geoph. 1984 Annual Meeting Abstracts, p 283.

Bogoslovsky, V.A., Kuzmina, E.N., Ogilvy, A.A. & Strakhova, N.A. (1979), *Geophysical Methods for Controlling the Seepage Regime in Earth Dams*, Bull. Int. Ass. of Eng. Geol., No 20, pp 249-251.

Bogoslovsky, V.A. & Ogilvy, A.A. (1970), *Application of Geophysical Methods for Studying the Technical Status of Earth Dams*, Geophysical Prospecting, vol. 18, pp 758-773.

Burgman, J.O.S., Eriksson, E., Kostov, L. och Möller, Å (1978), *Application of Oxygen-18 and Deuterium for Investigating the Origin of Groundwater in Connection with a Dam Project in Zambia*. I rapporten från ett internationellt symposium som hölls i Wien, Isotope Hydrology, vol. 1. IAEA, 1979, s. 27-42.

Butler, D. K. & Llopis, J.L. (1990), *Assessment of Anomalous Seepage Conditions*, Soc. Expl. Geophys., Tulsa, Investigations in Geophysics no. 5: Geotechnical and Environmental Geophysics vol 2, pp 153-173.

Cederwall, K., Nilsson, Å. (1991), *ICOLD Committee on ageing of dams description of three deterioration scenarios*, Report No. 49 Inst. för vattenbyggnad KTH, Stockholm, 48 p.

Corwin, R. F. (1990), *The Self-Potential Method for Environmental and Engineering Applications*, Soc. Expl. Geophys., Tulsa, Investigations in Geophysics no. 5: Geotechnical and Environmental Geophysics vol 1, pp 127-145.

Dahlin, T. (1989), *The Development of a Cable System for Vertical Electrical Sounding and a Comparison of the Schlumberger and Offset Wenner Methods*, Lunds Tekniska Högskola, Avd. för Teknisk Geologi, Lic. avh., LUTVDG/(TVTG-1005)/1-77(1989), 77 p.

Easey, J. & Hanna, G.L. (1985), *A study of leakage from Pedu dam, Kedah, Malaysia*, IAEA's TC Project, Report AAEC/C48, Australian Atomic Energy Commission.

Enmark, T. & Nissen, J. (1989), *WADI - VLF kurs, Kurs-kompendium*, ABEM, 30 s.

Gereben, L. & Pramborg, B. (1990), *Rayleighvågsmätningar i friktionsjord och fast lera*, BFR, 27 s.

Gex, P. (1980), *Phénomènes d'électrofiltration liés à quelques sites de barrages*, Bull. Soc. Vaud. Sc. Nat., no. 357, vol. 75, pp 39-50.

Guizerix, J., Molinari, J., Gaillard, B., Santos-Cottin, H., Mornas, A., & Corda, R. (1967), *Localisation des fuites sur un grand réservoir à l'aide de traceurs radioactifs*. I rapporten från ett internationellt symposium som hölls i Wien, Isotopes in Hydrology, IAEA, s. 587-599.

Hadley, L.M. (1983), *A Geophysical Method of Evaluating Existing Earth Embankments*, Bulletin of the Association of Engineering Geologists, vol. XX, nr. 3, p. 289-295.

Hesselblom, Å. (1985), *Kartläggning av svaghetszoner i berg med geofysiska metoder*, Sveriges Geologiska AB, 17 s.

Johansson, S. (1990), *Detektering och kvantifiering av vattenläckage i jord- och stenfyllningsdammar genom temperaturmätningar*, Kungl. Tekniska Högskolan, Stockholm, Inst för Vattenbyggn., rapport no 45, 53 s.

Johansson, S. (1991), *Localization and quantification of water leakage in ageing embankment dams by regular temperature measurements*, Commission Internationale Des Grands Barriages 17c Congrès des Grands Barriages, Vienne, pp 991-1005.

Johansson, S. & Berglund, S. (1991), *Temperaturmätningar i fyllningsdammen vid Näs kraftstation 1988-1991*, Report No. 54, Inst. för vattenbyggnad KTH, Stockholm, 26 s.

Johansson, S., Landin O. och Ulriksen P. (1991), *Lokalisering av tät kärnans krönnivå med georadar*, VAST Stocckholm, 97 s.

Knutsson, G (1966), *Tracers for ground water investigations*. I rapporten från ett internationellt symposium som hölls i Stockholm, Wenner-Gren Center International Symposium Series, vol. 11, Ground Water Problems, redigerad av E. Eriksson, Y. Gustafsson och K. Nilsson, Pergamon Press, Storbritannien, 1968, s. 123-152.

Kunetz, G. (1966), *Principles of Direct Current Resistivity Prospecting*, Gebrüder Bornträger, Berlin, 103p.

Kramer J.H., Cullen S.J., Everett L.G. (1992), *Vadose Zone Monitoring with the Neutron Moisture Probe*, Ground Water Monitoring Review, vol. Summer, pp. 177-187.

Leonov, M.P. och Svitel'skaya, L.I. (1990), *Hydrological regime of the foundation of the Charvak dam after ten years operation*. Översättning från ryska, ASCE, Hydrotechnical Construction, vol. 23, nr. 9, s. 542-548.

Losjö, K. (1994), *Analys av vatten från läckande dammar*, Elforsk, Stockholm, xx s.

Markiewicz, R.D. & Randall, J.A. (1984), *The Use of Self-Potential Surveys in Geotechnical Investigations*, Soc. Expl. Geoph. 1984 Annual Meeting Abstracts, p 283.

Merkler, G.-P., Milittzer, H. Hötzl, H., Armbruster H., Brauns J. (1989), *Detection of Subsurface Flow Phenomena*, Lecture Notes in Earth Sciences, Springer Verlag, 514p.

Militzer, H., Schön, J., Stötzner, U. & Stoll, R. (1978), *Angewante Geophysik im Ingenieur- und Bergbau*, VEB Deutscher Verlag für Grudstoffindustrie, Leipzig, 318p.

Müllern, C.-F. & Eriksson L. (1982), *Möjligheter till analys av VLF-anomalier vid prospektering efter grundvatten i berg*, SGU, Uppsala, 24 s.

Nilsson, Å. (1994), *Beprövade metoder för övervakning och undersökning av fyllningsdammar*, Elforsk, Stockholm, xx s.

Ogilvy, A.A., Ayed, M.A. & Bogoslovsky, V.A. (1969), *Geophysical Studies of Water Leakages from Reservoirs*, Geophysical Prospecting, vol. 17, pp 36-62.

Olsson, O. et al. *Investigation of fracture zones in crystalline rock by borehole radar*, Sveriges Geologiska AB, Uppsala, 10p.

Olsson, O. (1986), *Borrhålsradar - ett sätt att se genom berg*, Sveriges Geologiska AB, Uppsala, 9 s.

Parasnis, D.S. (1979), *Principles of Applied Geophysics*. Chapman and Hall, London, Storbritannien, 275 s.

Plata Bedmar, A (1991), *Detection of Leaks from Reservoirs and Lakes*. I rapporten från ett rådgivande möte mellan internationella experter som hölls i Wien 1990, IAEA-TECDOC-601, s. 71-129.

Rao, M.B.R. (1953), *Self-Potential Anomalies Due to Subsurface Water Flow at Garimenapenta*, Madras State, India, Trans. Am. Inst. Of Mining and Metall. Eng., TP3505L, pp 400-403.

Robinson, E.S. & Coruh, C. (1988), *Basic Exploration Geophysics*, Wiley, 562p.

Schiavone, D. & Quarto, R. (1984), *Self-Potential Prospecting in the Study of Water Movements*, Geoexploration, vol. 22, pp 47-58.

Schlumberger (1987), *Log Interpretation Principles/Applications*, Schlumberger Educational Services, Houston, USA

Sill, W.R. (1983), *Self-potential modeling from primary flows*, Geophysics, vol 48 pp 76-86.

Sjögren, B. (1984), *Shallow Refraction Seismics*, Chapman and Hall, London, Storbritannien, 268p.

Skov-og Naturstyrelsen (1987) *Geofysik og råstofkortlægning*, Statens Informationstjenste, København, Råstofkontortets kortlægningsserie 5, 213s.

Telford W.M., Geldart L.P., Sheriff R.E., Keys D.A. (1976), *Applied Geophysics*, Cambridge University Press, New York, USA, (reprinted 1985)

Triumf, C-A. (1992), *Geofysik för geotekniker*, T31:1992 BFR, 84 s.

Ward, S. H. (1990), *Resistivity and Induced Polarization Methods*, Soc. Expl. Geophys., Tulsa, Investigations in Geophysics no. 5: Geotechnical and Environmental Geophysics vol 1, pp 147-189.

Williams, G. W. (1986), *Seepage Studies Using Tracers and the Self-Potential Test*, Am. Soc. Civil Eng., New York, Geotechnical Spec. Publ. no 6, pp 1134-1149.

Yost, C.Jr. och Naney, J.W (1974): *Water Quality Effects of Seepage from Earthen Dams*. I Journal of Hydrology, vol. 21, pp. 15-26.

10. BILAGOR

BILAGA 1

Beräkning av känslighet vid porositetsförändringar

BILAGA 2

Bedömning av metoder

BILAGA 3

Praktikfall nya metoder. Besök vid Uljua damm, 1992-05-12

BILAGA 4

Praktikfall nya metoder. Peruca, Kroatien

	PUNKTFORM					PLAN					DIFFUS					N+ U+ M+ F/2 + H/2	N+ U+ M+ F+ H $\bar{12}$	N+ U+ M	N+ U+ M $\bar{9}^*$	F + H $\bar{2}$	N+ U+ F/2+ H/2	N+ U+ F/2 + H/2 $\bar{9}^{**}$
ERRHÅLS- METODER	N	U	M	F	H	N	U	M	F	H	N	U	M	F	H							
errhålsradar	3	3	2	0	0	3	3	2	0	0	2	2	2	0	0	22	1,8	22	2,4	0,0	16,0	0
nic Cross-hole	2	3	2	0	0	2	2	2	0	0	2	2	2	0	0	19	1,6	19	2,1	0,0	13,0	0
årämne	2	3	0	3	3	2	1	0	3	3	2	2	0	3	3	21	1,8	12	0	9,0	21,0	2,3
mma loggning	1	1	2	0	0	1	1	2	0	0	1	1	2	0	0	12	1,0	12	1,3	0,0	6,0	0
utron loggning	1	1	2	0	0	1	1	2	0	0	1	2	2	0	0	13	1,1	13	1,4	0,0	7,0	0
mperatur	1	2	0	3	2	3	2	0	3	2	3	3	0	3	2	22	1,8	14	0	7,5	21,5	2,4
ON-DESTRUCTIVE- STING																						
fraktionsseismik	0	0	1	0	0	1	1	1	0	0	1	1	1	0	0	7	0,6	7	0,8	0,0	4,0	0,4
fleksionsseismik	3	2	2	0	0	3	3	3	0	0	1	1	1	0	0	19	1,6	19	2,1	0,0	13,0	1,4
olod	3	2	2	0	0	3	3	3	0	0	1	1	1	0	0	19	1,6	19	2,1	0,0	13,0	1,4
ågsseismik	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	2	2	1	0	0	8	0,7	8	0,9	0,0	6,0	0,7
oradar	2	3	2	0	0	2	3	3	0	0	1	1	2	0	0	19	1,6	19	2,1	0,0	12,0	1,3
F	1	1	1	0	0	1	1	1	0	0	1	1	1	0	0	9	0,8	9	1,0	0,0	6,0	0,7
rogram	1	1	1	0	0	1	1	1	0	0	1	1	1	0	0	9	0,8	9	1,0	0,0	6,0	0,7
lvpotential	3	3	0	3	3	2	2	0	3	3	2	2	0	3	3	23	1,9	14	1,6	9,0	23,0	2,6
sistivitet	1	1	2	1	0	2	2	2	1	0	2	2	3	1	0	19	1,6	17	1,9	1,5	11,5	1,3
sistivitet + ucerad polarisation	1	1	2	0	0	2	2	2	0	0	2	2	3	0	0	17	1,4	17	1,9	0,0	10,0	0
mografi	1	1	1	2	2	1	1	1	2	2	1	1	1	1	1	14	1,2	9	1,0	5,0	11,0	1,2
RIGA METODER																						
skljud	2	2	0	0	3	1	1	0	0	3	1	1	0	0	3	13	1,1	8	0,9	4,5	12,5	1,4
årämne	1	1	0	3	3	1	1	0	3	3	1	1	0	3	3	15	1,3	6	0,7	9,0	15,0	1,7
drokemisk analys	2	1	0	3	3	2	1	0	3	3	2	1	1	3	3	19	1,6	10	1,1	9,0	18,0	2,0
biditetstest	2	2	0	2	3	1	0	0	2	3	1	0	0	2	3	14	1,2	6	0,7	7,5	13,5	1,5

* Om M=0 för de olika skadetyperna har medelvärdet satts till 0

** Ombåde F=0 och H=0 för de olika skadetyperna har medelvärdet satts till 0

BESÖK VID ULJUA DAM, 1992-05-12

Deltagare: Arne Ericsson, Gränseverken
Jan Eurenus, VBB/VIK
Lars Gustavsson, VBB/VIK
Sam Johansson, AIB
Bo Wängenberg, Gränseverken

Vi anlände till Helsingfors varifrån vi reste till Uleåborg tillsammans med våra finska värdar:

Risto Kuusiniemi, Vatten- och miljöförvaltningen i Finland: Risto representerar dammägaren och har arbetat med FoU inom geoteknik, främst frostproblem i fyllningsdamm.

Hans Rathmayer, VTT Technical Research Center: Hans ansvarar för ca 14 personer som främst arbetar med geoteknik och grundläggning. Han är också utlandssekreterare för Finlands Geotekniska Förening.

Jukka Pöllä, VTT Technical Research Center: Jukka har arbetat med injektering, slutförvaring av kärnbränsle, föroreningsproblem och geofysik.

Till Uljua damm som ligger ca 100 km sydost Uleåborg färdades vi komfortabelt i husbil. Vid dammen anslöt också representanter från en entreprenör som arbetar med ett nytt utskov, utloppskanal och vägbro.

Nedan följer noteringar som gjordes vid besöket. Noteringarna är inte fullständiga utan är avsedda som ett komplement till den artikel som våra värdar skrivit i Hydro Power & Dam Construction March 1992. För att underlätta för den eventuella läsaren av denna rapport har dock vissa nyckeluppgifter medtagits.

Uljua damm

Uljua damm är en fyllningsdamm grundlagd på isälvsavlagringar vilande på berg (porfyrisk granodiorit som är mylonitiserad i vissa zoner). Dammen är ca 10 km lång och höjden är ca 13 m. Täckningen består av morän, filter av grus och stödfyllning av sprängsten. Vattenmagasinet innehåller ca 150 Mm³.

I Finland är dammarna säkerhetsklassade benämnda P, N och O. P är den klass med högst säkerhetskrav. Detta innebär bl a krav på att katastrofplaner finns utarbetade liksom dammbrottsanalyser samt att kompletterande massor finns tillgängliga. Detta sista krav visade sig vara av stort värde.

Vid första fyllningen av vattenmagasinet konstaterades lokala vattenläckage vid dammens nedströmsfot vilket tätades med injektering. Skadeorsaken har inte helt klarlagts men man förmodar att inhomogeniteter i isälvs materialet bidragit till ökad vattenströmning med inre erosion som följd.

Skadans upptäckt

Den 13 maj 1990 noterades transport av finmaterial via läckagevattnet ut i utloppskanalen ca 100 m nedströms dammen. Detta skedde i ett område där man ej haft problem vid den första uppfyllningen. För att lokalisera och bedöma skadan vidtogs omfattande undersökningar.

Undersökningsmetodik

Flera undersökningsmetoder användes parallellt för att lokalisera och bedöma skadans omfattning.

Resistivitmätningar utfördes av Universitetet i Uleåborg. Tydliga anomalier konstaterades ca 30 m höger om kraftstationen. Mätresultatet och metoden bedömdes vara bra.

Tre **seismiska** mätprofiler utfördes, varav en på dammens krön och två sektioner nedströms dammen. Vid skadan var våghastigheten i berget mellan 3000 och 4000 m/s. Med de seismiska profilerna kunde läckagevägen genom berget till utloppskanalen skönjas. Likaså kunde två vattenförande skikt särskiljas.

Med **spårämneshörsök** uppmättes transporthastigheten till mellan 1.6 och 7 m/minut. Som spårämne användes vanlig livsmedelsfärg.

Med **georadar** erhöles tydliga reflexer i berget vilka tolkades som vattenförande lager.

Borringar för injektering samt kärnborringar i berg utfördes i ett flertal punkter. Kärnborringarna verifierade de seismiska mätningarna.

Stötvågmätning, liksom **gamma-loggning** i borrhål användes för att mäta densitetsvariationer. Gamma-loggning sker nu regelbundet i några rör med ett ryskbyggt instrument.

Visuell inspektion av dammen utfördes av dykare på dammens uppströmssida.

Skadeförlopp

Den 29 maj, dvs 16 dagar efter att slamhaltigt vatten konstaterades i utloppskanalen uppstod ett sjunkhål intill ett av de nedsatta injekteringsrören. En pall med injekteringsmedel samt utrustning sjönk ned i sjunkhålet, som blev ca 7 m långt och tre meter djupt). Uppskattningsvis försvann 50 à 100 m³ filtermaterial. Senare samma dag skedde också ett skred på dammens nedströmssida i ungefär samma sektion som sjunkhålet uppkommit.

Skadeförloppet redovisas utförligt i ovan nämnda artikel. Därutöver kan nämnas att bergets porositet under det skadade området uppskattades till ca 10%. Bergsprickorna

vid utloppskanalen var lerfyllda liksom de förmodligen också var i det övriga berget. Vid fullt pådrag i stationen är vattenståndet i utloppskanalen ca 2 m högre än vid noll-flöde. Dessa växelvisa variationer kan ha bidragit till att leran i berget successivt eroderats. (Detta utöver den transport som kan orsakas av läckaget under dammen samt grundvattenströmmen nedströms dammen.)

När skadorna inträffat larmades berörda myndigheter enligt den uppgjorda handlingsplan som finns för dammar med hög säkerhetsklass.

Akuta reparationer

Reparation av dammen påbörjades omedelbart. För att ersätta bortroderat material tippades ca 10 000 m³ filtermaterial på dammens uppströmssida så att en blanket erhöles. Detta utfördes på ca två dygn. Massorna utlades med bandtraktor. På nedströmssidan tippades dessutom ca 2000 m³ stenfyllning.

Det bör noteras att dessa massor fanns lagrade i närheten av dammen enligt de gällande dammsäkerhetsföreskrifterna. Detta möjliggjorde att materialet snabbt kunde komma på plats. Tillgången på massor var inte den begränsande faktorn utan det var transportvägarna på dammen. Lastbilarna var tvungna att backa och fick därför invänta varandra.

Permanent reparationer

Inför den permanenta reparationen utfördes en fångdam så att arbetena kunde utföras i torrhet. Överblivna massor lades sedan mellan dammlinjen och fångdammen så att en blanket erhöles. Arbetet påbörjades sommaren 1990.

Injektering av cement och PU utfördes i tre linjer ned till ett djup av ca 10 m, jfr artikeln. På en sträcka av 60 m injekterades 30 % av all cement och 90% av all PU. Det var svårt att bedöma härdningstiden för PU, vilket skedde genom Trial-and-error på plats genom tillsats av retardationsmedel. Livslängden på PU bedöms vara ca 10 år.

Tätning utfördes också i jord där ca 3.5 ton cement och ca 1 ton Geoseal injekterades.

Utmed den mest skadade delen ersattes dammkärnan av betongcylindrar med 1.2 m diameter, vilka tätats mot berg genom injektering.

Kontroll av reparation

Reparationen kontrollerades genom läckagemätningar samt analys av detsamma. Läckagevattnet smälades upp i en mindre damm där man dagligen mätte pH, Redox potential, förhållandet mellan Fe²⁺/Fe³⁺ samt förekomst av plankton Melosira sp.

I slutet av september hade läckagevattnet återfått grundvattenkaraktär:

- redoxpotentialen hade minskat från 350 till 80 mV
- förhållandet mellan $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ ökade från 30 till 300
- inget biologiskt material kunde återfinnas (planktonarten *Melosira* sp.)

För framtida kontroll har ett porttrycksmätare installerades vilka anslutits till en dator. Dessutom mäts vattenytan manuellt i ett flertal vattenståndsrör. Man har också möjlighet att göra gamma-log mätningar i ett rör.

Skadeorsaker

- Den underliggande moränen var tät men eroderbar
- Vattenståndsvibrationerna i utloppskanalen påskyndade erosionen av lermaterialet i bergsprickorna
- Horisontella sprickor i berget på samma nivå som vattenståndsvibrationerna underlättade erosionsförloppet
- På grund av borringarna förstärktes erosionsförloppet som förmodligen pågått sedan dammen byggdes. Vid borringarna användes tryckluft vilket har större påverkan på erosionsförloppet än vatten.

Slutsatser

Beredskapsplaner är värdefulla vid incidenter:

I detta fall visste man vad som kunde hända och vad man i så fall skulle göra och hur det skulle göras. Myndigheter kontaktades, maskiner och lastbilar inkallades, material fanns lagrat och varför arbetet kunde komma igång snabbt. Förmodligen var man extra förberedd eftersom utläckning av slamhaltigt läckagevatten pågått i drygt två veckor innan skadan uppstod. Undersökningsarbeten pågick och reparationsarbeten förbereddes. Tack vare dessa faktorer kunde skadan begränsas.

Erosionsförlopp kan accelereras genom vattenståndsvibrationer:

Erosion av lermaterialet i bergsprickorna har förmodligen skett successivt trots att berget varit täckt av 10 m tät och väl lagrad morän. Erosionen uppkom på den nivå där vattenståndsvibrationerna i utloppskanalen förekom.

Geofysiska metoder ger värdefull kunskap:

Geofysiska metoder kan idag ge värdefull kunskap om läckagevägar i och intill dammar. De kan också användas för att vid dammbyggnationen indikera farliga geologiska strukturer.

Solna 1992-06-16

Sam Johansson

GEOPHYSICAL INVESTIGATION AT THE PERUĆA DAM

Andelko Salković
Manager
MOHO Ltd.
127 Sv. Mateja
41000 Zagreb
Croatia

Dinko Dujmić
Adviser
MOHO Ltd.
127 Sv. Mateja
41000 Zagreb
Croatia

SUMMARY

Geophysical investigation at Peruća dam was carried out soon after urgent remedial works had been finished. The aim of measurements was to establish, in a fast manner, locations of damage of the dam body. Three geophysical methods have been used: seismic refraction, self potential measurements and resistivity profiling. The results of the implemented methods are in a good concordance with each other. The program of further, detailed investigation of the dam and bedrock has been proposed.

INTRODUCTION

Geophysical measurements at the Peruća dam were carried out on 2 and 3 February. Their scope has been to establish the locations and extent of the damage on the dam body, particularly damage which has not yet been observed either on the dam crest or in the upstream and downstream sections of the dam body.

At the beginning of the measurement work, on 2 February, the water level in the reservoir was at elevation 352.0 m.a.s.l.

The following measurement techniques have been used:

- seismic refraction (see Fig. 1)
- self potential (see Fig. 2)
- resistivity profiling (mapping) (see Fig. 3).

Since at the beginning of the geophysical measurement the danger of non exploded mines had not been entirely eliminated, only access to the road at the dam crest was possible. This greatly influenced the extent and the measurement methods.

1. SEISMIC REFRACTION METHOD

Seismic refraction measurement was intended to define velocities of the primary wave inside the dam body, since it was expected that explosion had created zones with low velocities (cavities and zones with degraded material). It was carried out on two profiles along the dam axis, each being 230 m long, with 24 geophones and three energy source points. Because of a 60 m of the profiles overlapping, the total investigation length was 400 m.

On the basis of the seismic refraction measurement results, it has been possible to evaluate the most significant damage which occurred at the left abutment and in the central part of the dam. Very small velocities of the primary waves (approximately 800 m/s) have been registered along the dam crest, (even less than 500 m/s in the zone of remedial works at left bank), and velocities of 1000 - 1250 m/s in the zones inside the dam body. Small velocities, ranging from 1000 to 1100 m/s were also registered in a narrow zone and at the edge of the right abutment of the dam.

In the remaining zones which sustained only minor damage, the velocities of the longitudinal waves ranged from 1540 to 1670 m/s. It has also been possible to establish damage to the bedrock beneath the gallery where explosion took place.

2. SELF-POTENTIAL MEASUREMENTS

The measurement of self-potential (SP, spontaneous potential) was done at 56 measuring points, 28 at each of two profiles on the upstream and downstream side of the road on the dam crest. The aim of the method was to establish existence and intensity of the streaming potentials generated by the water passing through the explosion made fractures. The self-potential map shows that along most of the dam crest the equipotential lines have mainly been parallel with the dam axis. This means that directions of filtration are perpendicular to the dam.

Towards the right abutment of the dam, a deflection of filtration direction from the vertical can be seen, which indicates a filtration component in the direction of the dam axis.

3. RESISTIVITY PROFILING

Resistivity profiling (mapping) was carried out at 35 measuring points spaced at 10 m intervals along the dam crest. At each measuring point four electrode spacings were used, setting the depth of investigation to approximately 20, 33, 47 and 60 m. The resistivity pseudo-section is shown at Fig. 3.

The results indicate five relatively wide zones with low values of apparent resistivity. This may be explained by the degradation of the material inside the dam body and in the bedrock additionally affected by water. Within these zones some more narrow zones can be distinguished having very low resistivity values, of less than 100 Ohmm, sporadically even less than 60 Ohmm in the dam, and less than 220 Ohmm in the bedrock.

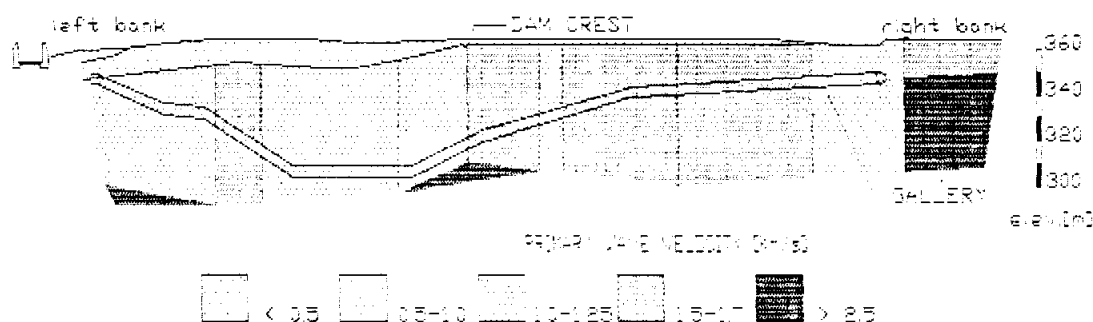


Figure 1. Seismic refraction

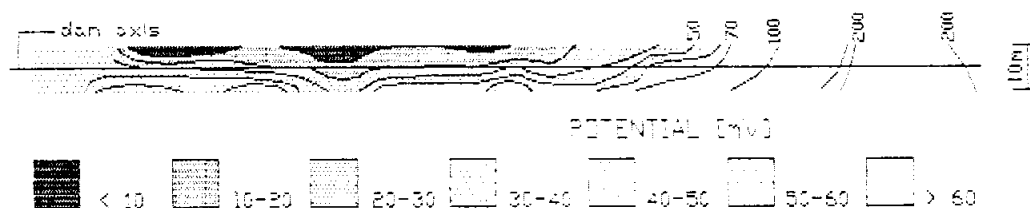


Figure 2. SP profiling

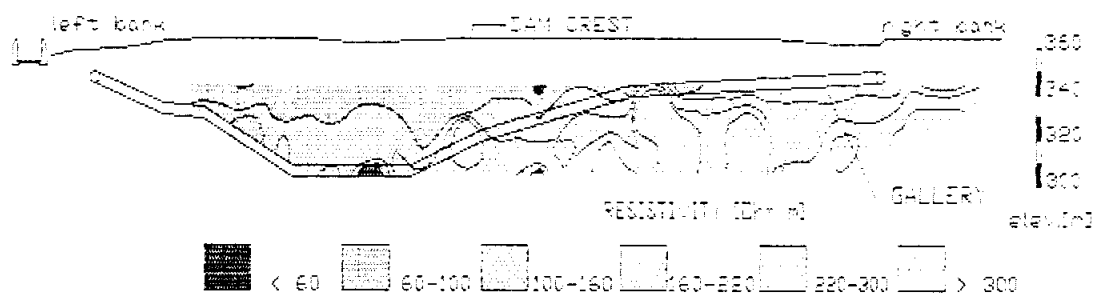


Figure 3. Resistivity profiling

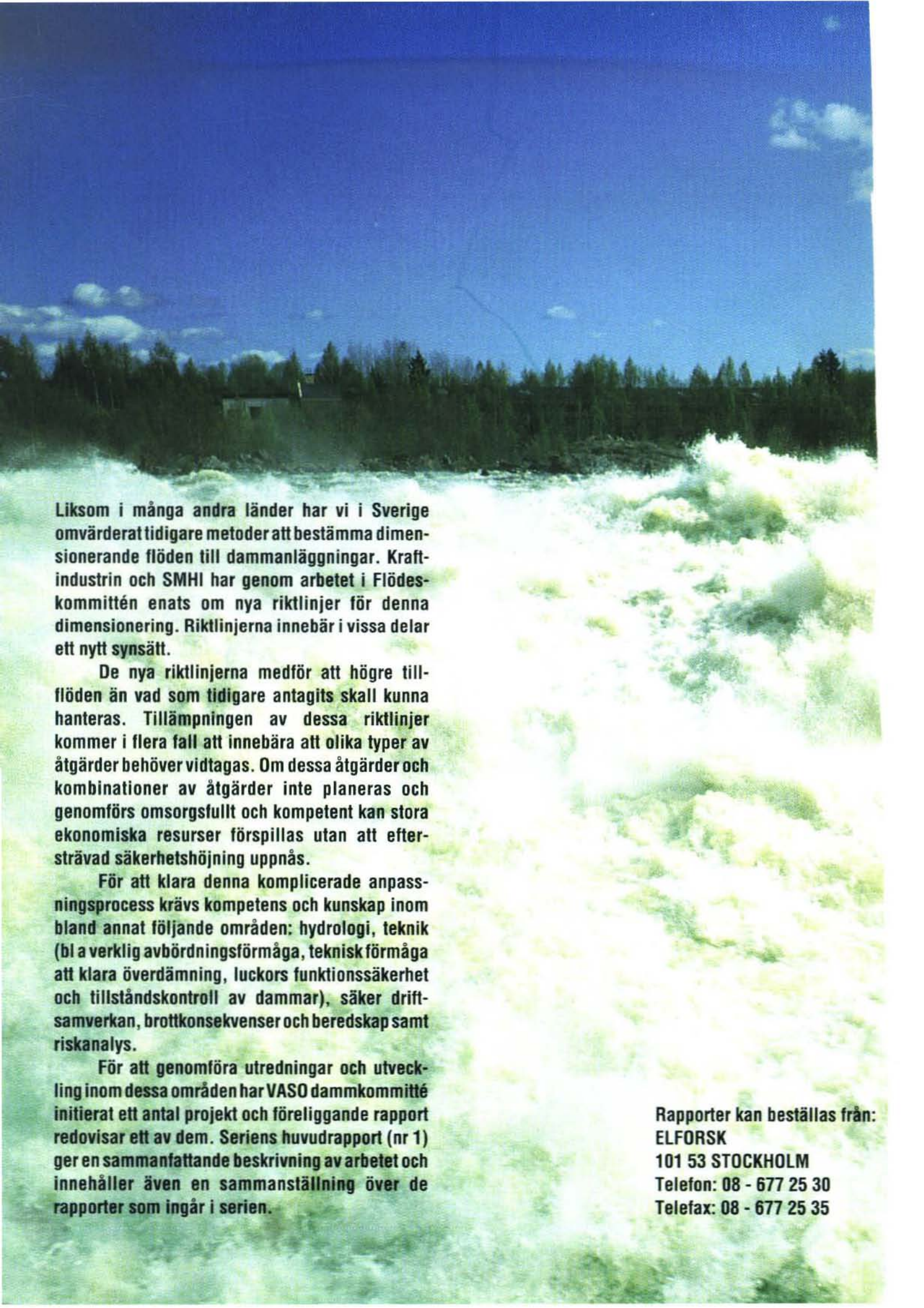
CONCLUSION

Generally, it may be said that there is a good agreement between the results of the various methods used. Low resistivity anomalies appear within zones with low values of the primary wave velocity, indicating areas where the most significant damage occurred. Self-potential measurements detect directions of the filtration which are in concordance with visually registered fractures on the dam crest.

Finally, on the basis of the results obtained so far, the new program of the geophysical investigation has been proposed. It can be divided to:

- detailed investigation of the clay core of the dam and bedrock by means of natural gamma-ray logging, in situ density logging, and high resolution seismic tomography,
- seismic refraction and self-potential measurements covering the area of the entire dam and the surrounding bedrock.

Thus, a large number of data will be obtained in order to derive a geotechnical model of the whole area under investigation.



Liksom i många andra länder har vi i Sverige omvärderat tidigare metoder att bestämma dimensionerande flöden till dammanläggningar. Kraftindustrin och SMHI har genom arbetet i Flödeskommittén enats om nya riktlinjer för denna dimensionering. Riktlinjerna innebär i vissa delar ett nytt synsätt.

De nya riktlinjerna medför att högre tillflöden än vad som tidigare antagits skall kunna hanteras. Tillämpningen av dessa riktlinjer kommer i flera fall att innebära att olika typer av åtgärder behöver vidtagas. Om dessa åtgärder och kombinationer av åtgärder inte planeras och genomförs omsorgsfullt och kompetent kan stora ekonomiska resurser förspillas utan att eftersträvad säkerhetshöjning uppnås.

För att klara denna komplicerade anpassningsprocess krävs kompetens och kunskap inom bland annat följande områden: hydrologi, teknik (både verklig avbördningsförmåga, teknisk förmåga att klara överdämning, luckors funktionssäkerhet och tillståndskontroll av dammar), säker driftsamverkan, brottkonsekvenser och beredskap samt riskanalys.

För att genomföra utredningar och utveckling inom dessa områden har VASO dammkommitté initierat ett antal projekt och föreliggande rapport redovisar ett av dem. Seriens huvudrapport (nr 1) ger en sammanfattande beskrivning av arbetet och innehåller även en sammanställning över de rapporter som ingår i serien.

Rapporter kan beställas från:
ELFORSK
101 53 STOCKHOLM
Telefon: 08 - 677 25 30
Telefax: 08 - 677 25 35