

GEOFYSISKA METODER INOM DAMMSÄKERHETSSOMRÅDET

RAPPORT 2019:571



Geofysiska metoder inom dammsäkerhetsområdet

En kunskapssammanställning

PONTUS SJÖDAHL

SAM JOHANSSON

TORLEIF DAHLIN

ISBN 978-91-7673-571-8 | © Energiforsk mars 2019

Energiforsk AB | Telefon: 08-677 25 30 | E-post: kontakt@energiforsk.se | www.energiforsk.se

Förord

Den här kunskapssammanställningen ger oss en uppdatering av vad som hänt inom dammsäkerheten på området geofysik de senaste 20 åren genom att utföraren har studerat den tekniska utvecklingen såväl som praktiska erfarenheter.

Mycket arbete genomfördes inom området på 90-talet men området har sedan dess inte varit prioriterat i Sverige. Den här studien ger en översikt av geofysik med fokus på tillämpningar inom dammsäkerhet samt ett antal rekommendationer för framtida studier och aktiviteter.

Studien har utförts av HydroResearch, med Pontus Sjödahl, Sam Johansson och Torleif Dahlin som utförare. Projektet har haft en referensgrupp knuten till sig under arbetets gång bestående av Jonas Hammarson (Fortum), Anders Isander (Uniper), Anders Sjödin (Statkraft) och Peter Viklander (Vattenfall).

Här redovisas resultat och slutsatser från ett projekt inom det Dammsäkerhetstekniska utvecklingsprogrammet som drivs av Energiforsk där vattenkraftindustrin och Svenska kraftnät medverkar. Det är rapportförfattaren/-författarna som ansvarar för innehållet.

Sammanfattning

Inom dammsäkerhetsområdet gjordes ett antal satsningar på geofysik under 1990-talet men den tekniska utvecklingen inom området sedan dess har ej fångats upp. Detta projekt syftar till att följa upp teknisk utveckling samt praktiska erfarenheter i Sverige och utomlands under de senaste 20 åren för att se hur det eventuellt kan komma dammsäkerhetsarbetet i Sverige till godo.

För att detektera skador i dammar krävs att den valda metoden har möjlighet att mäta avvikelser i relevanta parametrar. Vid inre erosion, förändras huvudsakligen läckageflöde, porositet och vattenmättnad. Tidigare studier har visat att de parametrar som är relaterade till läckageflöde eller förändringar i läckageflöde är mer känsliga än de som är relaterade till materialegenskaper och materialförändringar. De flesta metoder mäter dock indirekta/sekundära parametrar, vilka översätts till det som är intressant för en dammsäkerhetsbedömning. Metoder som fokuserar på flödesberoende parametrar har störst potential.

En genomgång av geofysiska mätmetoder har gjorts med korta redogörelser för fysikalisk princip, praktiskt tillvägagångssätt, utvärderingsmetodik, möjligheter och begränsningar. För en del av metoderna har en utökad metodbeskrivning redovisats i bilagor. För varje metod eller grupp av metoder har en kort bedömning utförts av lämpligheten för dammsäkerhetstillämpningar.

Snabb teknisk utveckling har lett till stora framsteg för akustiska metoder, främst refraktionsseismik och ytvågsseismik. Dessa metoder kan vara relevanta idag men har hittills haft få tillämpningar i svenska dammar. Även för denna teknik kan kombination med optisk mätning innebära ett tekniksprång.

Elektriska metoder har i tidigare forskningsprojekt utvecklats och anpassats för dammövervakning. Metoden används idag vid svenska dammar, men har under senare år inte tillägnat sig den teknikutveckling som skett inom andra områden. Därför finns det, främst för resistivitet och inducerad polarisation, en outnyttjad utvecklingspotential. Det skulle vara tekniskt möjligt att göra 4D inversion, dvs. analysera förändring i tiden i modeller som geometriskt beskriver dammen i 3D.

Bland de elektromagnetiska metoderna har georadar historiskt haft störst tillämpning och teknikutvecklingen har även här varit betydande. Metoden har stor potential för undersökning men begränsad potential för övervakning.

Temperaturmätning är den metod som används mest, vilket bedöms bero på goda grundförutsättningar, tidiga satsningar med lovande resultat samt teknisk utveckling för distribuerad temperaturmätning med optisk fiber.

Denna rapport är huvudsakligen en kunskapssammanställning som kan vara ett avstamp inför en ny satsning på geofysiska metoder. En möjlig väg framåt är att öka kunskapen kring användande av geofysiska metoder genom t.ex. utbildnings-satsningar eller geofysikseminarium. En annan satsning är att skapa en branschgemensam dokumentation kring geofysikerfarenheter. Ett antal forsknings- och utvecklingsförslag har presenterats för några av metoderna för att göra dem mer attraktiva för dammsäkerhetstillämpningar.

Summary

In the 1990s lots of effort were put into developing the use of geophysics within the area of dam safety. However, since then the technological development in the area has not been taken advantage of. This project aims to follow up on technical development and practical experience in Sweden and abroad over the past 20 years to see how it may benefit the dam safety work in Sweden.

In order to detect damages in dams, the chosen method must be able to measure deviations in relevant parameters. In the case of internal erosion, there is an expected change in leakage flow, porosity and water saturation. Previous studies have shown that the parameters that are related to leakage flow or changes in leakage flow are more sensitive than those related to material properties and material changes. Most methods, however, measure indirect/secondary parameters, which are translated into what is interesting for a dam safety assessment. Methods that focus on flow-dependent parameters have the greatest potential.

A review of geophysical methods has been made with brief descriptions of the physical principle, practical approach, evaluation methodology, possibilities and limitations. For some of the methods, an extended method description has been reported in appendices. For each method or group of methods, a condensed assessment has been made of the suitability for dam safety applications.

Rapid technical development has led to great advances for acoustic methods, primarily refraction seismic and surface wave seismic. These methods may be relevant today but have so far had few applications in Swedish dams. Furthermore, for this technology, the use of fibreoptic measurements can be a technology leap.

In previous research projects, electrical methods have been developed and adapted for dam monitoring. The method is used today in Swedish dams but has in recent years not been updated in terms of the technology development that has taken place in other areas. Therefore, there is an unutilised development potential, mainly for resistivity and induced polarisation. It would be technically possible to make 4D inversion, i.e. analyse change in time in models that geometrically describe the dam in 3D.

Among the electromagnetic methods, ground penetrating radar, GPR, has historically had the greatest application, and recent technology development has also been significant. The method has great potential for examination but limited potential for monitoring.

Temperature measurement is the most widely used method, due to strong relation between temperature and seepage. Most likely early projects with promising results and technical development for distributed temperature measurement with optical fibre has paved the way for this.

This report is mainly a compilation of knowledge that can be a starting point for new interest in geophysical methods. One possible way forward is to increase the

knowledge about the use of geophysical methods by, for example, educational initiatives or geophysics seminars. Another initiative is to create an industry-wide documentation of geophysical experiences. A number of research and development proposals have been presented for some of the methods to make them more attractive for dam safety applications.

Innehåll

1	Inledning	9
1.1	Bakgrund och Syfte	9
1.2	Genomförande	9
1.3	Avgränsningar	10
1.4	Organisation	10
2	Övervakning och utvärdering av dammars säkerhet	11
2.1	Fyllningsdammars uppbyggnad och svenska förhållanden	11
2.2	Felmoder och relevanta brottscenarier	12
2.3	Felmodsanalyser	13
2.4	Syfte med mätning	14
2.5	Mätparametrar	15
2.5.1	Direkta/Primära mätparametrar	15
2.5.2	Indirekta/Sekundära mätparametrar	16
2.5.3	Flödes- eller materialberonde mätparametrar	18
2.6	Skadetyper och mätparametrar	19
3	Mätmetoder	21
3.1	Temperaturmätning	21
3.2	Elektriska metoder	22
3.2.1	Självpotential, SP	22
3.2.2	Resistivitet, ERT	23
3.2.3	Inducerad Polarisation, IP	23
3.2.4	Bedömning av elektriska metoder	23
3.3	Akustiska metoder	24
3.3.1	Refraktionsseismik	25
3.3.2	Reflektionsseismik	25
3.3.3	Ytvågsseismik	25
3.3.4	Ekolod/Sonar	26
3.3.5	Läckljudsmätning	26
3.3.6	Övriga seismiska metoder	26
3.3.7	Bedömning av akustiska metoder	27
3.4	Georadar	28
3.5	Induktiva elektromagnetiska metoder	29
3.5.1	Very Low Frequency, VLF	29
3.5.2	Radio magneto-tellurik, RMT	30
3.5.3	Slingram	30
3.5.4	Transient elektromagnetisk sondering, TEM	30
3.5.5	Magnetisk resonanssondering, MRS	31
3.5.6	Elektromagnetisk profilering	31
3.5.7	Bedömning av induktiva elektromagnetiska metoder	31

3.6	Magnetiska metoder	32
3.7	Gravimetriska metoder	33
3.8	Övriga metoder	34
3.8.1	Geofysisk borrhålsloggning	34
3.8.2	Analys av läckagevatten och turbiditetsmätning	34
3.8.3	Bedömning av övriga metoder	35
4	Metodernas användning inom dammsäkerhet	36
4.1	Introduktion	36
4.2	Generell övervakning	37
4.2.1	Temperaturmätning i svenska dammar	37
4.2.2	Resistivitetsövervakning i svenska dammar	39
4.3	Övervakning av specifika felmoder	39
4.3.1	Undersökning och övervakning av sjunkhål (WAC Bennett Dam)	40
4.3.2	Inre erosion i undergrund (invallningar)	42
4.4	Andra tillämpningar	43
4.5	Fullskaletester på dammar	44
4.5.1	Ijkdijk, Nederländerna	44
4.5.2	Røssvatn, Norge	45
4.5.3	Andra exempel på fullskaleförsök	47
5	Diskussion	49
5.1	Pågående teknikutveckling - Allmänt	49
5.2	Internationella riktlinjer/Erfarenheter för användning av geofysiska metoder på dammar	50
5.3	Framtida möjligheter	51
6	Slutsatser och rekommendationer	52
7	Referenser	54
Bilaga A:	Temperatur	62
Bilaga B:	Självpotential	64
Bilaga C:	Resistivitet	68
Bilaga D:	Inducerad Polarisation	74
Bilaga E:	Refraktionsseismik	78
Bilaga F:	Ytvågsseismik	82
Bilaga G:	Georadar	85
Bilaga H:	Borrhålsmetoder	90

1 Inledning

1.1 BAKGRUND OCH SYFTE

Inom dammsäkerhetsområdet gjordes i Sverige ett antal satsningar på geofysik under 1990-talet. Dessa satsningar utmynnade i rapporter, praktiska tester och installationer, men den tekniska utvecklingen inom området sedan dess har ej fångats upp. Detta projekt syftar till att följa upp teknisk utveckling samt praktiska erfarenheter i Sverige och utomlands under de senaste 20 åren för att se hur det eventuellt kan komma dammsäkerhetsarbetet till godo.

Syftet med denna rapport är att ta fram en nulägesbeskrivning av geofysiska metoder inom dammsäkerhetsområdet.

1.2 GENOMFÖRANDE

Uppdraget har utförts som en litteraturstudie och omfattar både nya metoder och sådana som är nya med avseende på tillämpning i Sverige. En målsättning har varit att denna kunskapssammanställning ska innefatta de metoder som den internationella marknaden erbjuder och att metoderna beskrivs i erforderlig detalj. Möjligheter, svårigheter, förutsättningar och begränsningar med respektive metod belyses, och i den mån riktlinjer finns på andra håll i världen beskrivs även dessa. Tanken är att lägga tonvikten på svenska förhållanden (t.ex. med beaktande av vinterförhållanden). Övriga aspekter som belyses är användbarhet för små respektive stora anläggningar samt praktiska erfarenheter.

Projektet tar avstamp i två tidigare rapporter. I dessa redovisas geofysiska metoder och deras möjligheter som läget såg ut för ca 20 år sedan:

- VASO rapport 21, "Nyare metoder för tillståndskontroll av fyllningsdammar", (Johansson et al. 1995).
- CEATI Report No T992700-0205A, "Investigation of geophysical methods for assessing seepage and internal erosion in embankment dams: A parameter study for internal erosion monitoring", (Johansson et al. 2005b).

I VASO rapport 21 beskrivs geofysiska metoder och deras tillämpbarhet inom dammsäkerhetsområdet. Fysikaliska grundprinciper bakom de olika metoder är desamma, men teknikutvecklingen de senaste 20 åren har varit betydande inom flera områden. En översyn av bedömningen av metoderna görs därför med dagens kunskap. Störst fokus i litteraturstudien läggs på de metoder som bedöms ha störst potential.

Parameterstudien (Johansson et al. 2005b) används för att bedöma grundförutsättningar för metoder att kunna detektera relevanta scenarier för dammsäkerhet, t.ex. realistiska materialförändringar vid inre erosion och ökad vattenströmning. Metodernas potential både för övervakning (driftsskede) och undersökningar av skador (incident) beaktas.

1.3 AVGRÄNSNINGAR

Geofysiska metoder är inte helt väldefinierat. I det här fallet har vi valt att inkludera relevanta metoder av geofysisk karaktär. En tydlig avgränsning är dock att geotekniska eller geodetiska metoder inte ingår i uppdraget. Till konventionella mätmetoder räknas läckagemätning och porttrycksmätning, vilket förklarar varför dessa ej medtagits.

Metoder som bedömts vara förtjänstfulla antingen inom kontinuerlig dammövervakning eller i undersökningssyfte (eller båda) har medtagits. Det har alltså inte gjorts någon åtskillnad på mätningens syfte även om det är centralt och diskuteras i samband med metodernas användbarhet. Vidare har ett antal väletablerade geofysiska metoder tagits med för fullständighetens skull, även om alla inte bedöms vara särskilt tillämpbara på dammar.

1.4 ORGANISATION

HydroResearch har varit huvudansvarig för arbetet, genom medverkan av Pontus Sjödahl (projektledare) och Sam Johansson (expert, kvalitetskontroll). Torleif Dahlin (expert), professor / forskare vid Teknisk geologi på Lunds tekniska högskola, har engagerats i uppdraget.

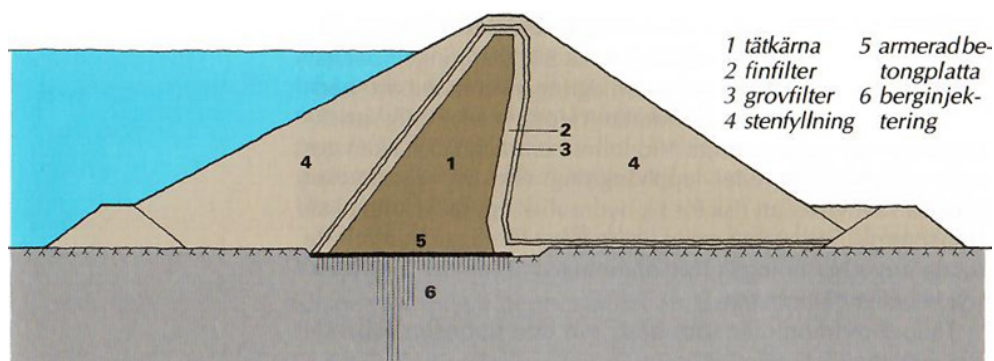
En referensgrupp har följt projektet och kommit med värdefulla synpunkter på arbetet. Styrgruppen för Dammsäkerhetstekniskt utvecklingsprogram har godkänt slutrapporten.

2 Övervakning och utvärdering av dammars säkerhet

I detta kapitel beskrivs dammövervakning med fokus på svenska förhållanden. Rapporten inriktar sig huvudsakligen på fyllningsdammar då geofysiska metoder tillämpas oftare på dessa. Beträffande betongdammar används geofysik huvudsakligen för undersökning av undergrunden. Dessutom ges en liten bakgrund till relevanta brottsförlopp och hur felmodsanalys kan vara ett hjälpmedel i dammsäkerhetsarbetet som naturligt kan kopplas till mätning och övervakning. De parametrar (mätbara storheter) som påverkas under felmodsutvecklingen identifieras.

2.1 Fyllningsdammars uppbyggnad och svenska förhållanden

De flesta svenska fyllningsdammar är uppbyggda på ett liknande sätt (Figur 1). Majoriteten av dammarna har en tätkärna av morän. Denna del har låg permeabilitet och begränsar vattenströmning genom dammen. På både uppströmssidan och nedströmssidan om tätkärnan finns en eller flera filterzoner uppbyggda av sand och grus. Filtrets uppgift är att förhindra urspolning av material från tätkärnan samt att dränera läckagevatten. Utanför filterzonerna är stödfyllningen placerad, i vissa fall med ett mellanliggande övergångslager. Stödfyllningen består normalt av grovkornig friktionsjord eller sprängsten och dess uppgift är att föra över den hydrauliska lasten till undergrunden och göra dammen stabil mot utglidningar.



Figur 1 Tvärsektion fyllningsdamm (modifierad från Vattenfall 1988).

Utbyggnaden av vattenkraften i Sverige avstannade omkring 1980, vilket innebär att det svenska dammbeståndet är relativt gammalt. Detta leder till ett ökat mätbehov i framtiden.

Dammhöjden är en viktig parameter för många geofysiska metoder där mätupplösningen avtar med djupet. De vanligast förekommande dammarna är relativt låga. Av de ca 200 höga dammar som finns i Sverige är 30 m en relativt

vanligt förekommande dammhöjd. Dammar högre än så ställer specifika krav på mätmetoder.

Klimatförhållanden kan vara en viktig faktor för val av övervakningsmetod. Svenska klimatförhållanden innebär låga temperaturer med frysning och tjälning under delar av året. Under sommartid når temperaturen i älvvattnet typiskt ca 15-20°C, vilket innebär en påtaglig säsongsvariation för temperaturen. Nederbörden är måttlig. Under vintertid magasineras nederbörden delvis i ett snötäcke. Älvvattnet är mestadels rent och klart med låga halter av sediment, lågt joninnehåll och låg elektrisk konduktivitet.

2.2 FELMODER OCH RELEVANTA BROTTSCENARIER

Enligt dammbrottsstatistik (Foster et al. 2000; Fell et al. 2005) är de dominerande orsakerna till dammbrott i fyllningsdammar överströmning (48%) och inre erosion (46%). Geofysiska mätmetoder kommer normalt inte i fråga för att detektera felförlopp i samband med överströmning, varför huvudfokus i denna rapport ligger på problem relaterat till skador i tätjorden/inre erosion.

Inre erosion kan ske både i damm och undergrund. Det uppstår när jordpartiklar transporteras nedströms med läckagevattnet. Man skiljer på fyra olika initieringsmekanismer (ICOLD 2015):

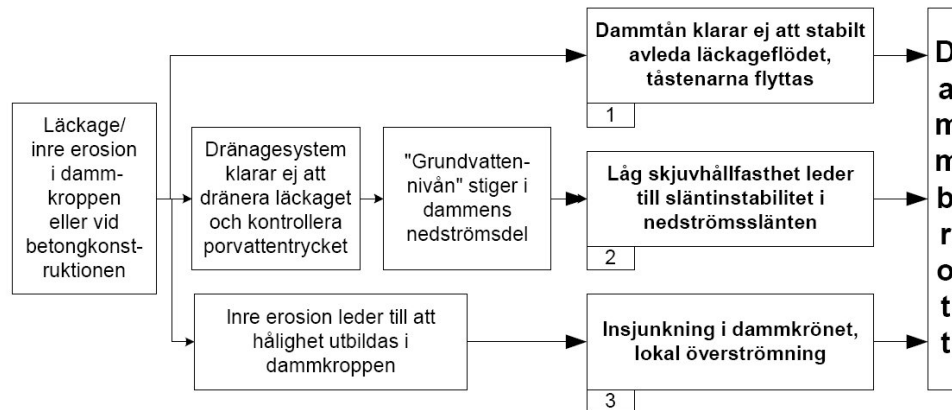
- *Koncentrerat läckage* som uppkommer i svaga zoner eller sprickor kan ta med sig material från omgivningen och därmed vidga kanalen.
- *Bakåtskridande erosion* (piping) utvecklas längs en läckageväg då den mynnar i ett bristfälligt filter. Jordpartiklar avsätts i slutet av läckagevägen och borttransporten av partiklar arbetar sig successivt bakåt i riktning mot magasinet.
- *Kontakterosion* sker i kontakten mellan två material där det ena är mer permeabelt. Vattenströmningen i det permeabla materialet för med sig jordpartiklar från det mindre permeabla materialet.
- *Suffusion* förekommer huvudsakligen i inre instabila språnggraderade material. Mindre partiklar transporteras i porerna i materialet och kornskelettet hålls uppe av större partiklar.

Gemensamt för dessa är att läckvattenflödet ökar liksom porositeten och vattenkvoten i det påverkade området, medan skadeutbredning och skadeutveckling kan variera. För eroderbara material, avsaknad av filter och höga vattenhastigheter, kan förloppet utvecklas snabbt. Även det motsatta har förekommit då processen sker långsamt. Det är inte ovanligt att inre erosion utvecklas i cykler där vattenföringen ökar för att sedan minska då omkringliggande material rasar in och tätar strömningsvägen (s.k. självläkning).

I utvecklingsfasen kan starkt vattenförande kanaler bildas genom damm eller undergrund. Även uppkomst av större områden med ökad porositet är möjligt. Borttransporten av jordmaterial kan leda till sättningar som kan fortplantas till dammens överyta och bilda sjunkhål.

Hur dammhaveriet utvecklar sig kan vara svårt att förutsäga, men tre mekanismer är mest sannolika (Figur 2). En möjlig utveckling är att läckvattenflödet ökar så

mycket att det eroderar materialet i dammtån. En annan utveckling är att dammen överströmmas på grund av att sjunkhål bildas i dammkrönet. En tredje möjlig utveckling är stabilitetsbrott orsakat av höga porvattentryck i dammens nedströmsdel på grund av läckageökningen.



Figur 2 Händelseträd för brottförlopp initierade av inre erosion i dammkroppen (RIDAS, 2012).

Förhöjd risk för inre erosion råder vid specialsituationer såsom första dämningssupptagning eller tillfällig överdämning, men inre erosion kan också utvecklas vid normal drift efter tiotals år.

Av beskrivningen ovan, om hur inre erosion uppkommer och utvecklas i en damm, kan några generella slutsatser dras beträffande mätning och detektion:

- Inre erosion utgör en grupp av komplexa processer och dess initiering och utveckling kan variera stort beroende på till exempel dammens uppbyggnad, undergrundens egenskaper, hydrauliska laster, inbyggda defekter, m.fl.
- Utvecklingsförloppen varierar stort, och kan utvecklas i cykler, men vissa nyckelparametrar ändras alltid. På lång sikt ökar porositeten i materialet liksom permeabiliteten.
- Processerna sker initialt i liten skala och utvecklas successivt. Därför är förloppen svåra att detektera tidigt, men upptäckt så tidigt som möjligt är angeläget.
- Det är svårt att förutse var inre erosion kommer att uppkomma. Därför är metoder som täcker in hela dammen värdefulla.

2.3 FELMODSANALYSER

Felmodsanalyser, eller PFMA från engelskans Potential Failure Mode Analysis, är ett sätt att arbeta strukturerat med dammsäkerhet. Det går ut på att identifiera olika sätt som en damm kan gå till brott på samt värdera dessa. Värderingen kan göras mer eller mindre avancerat. I vissa fall kan en relativt enkelt kvalitativ bedömning utföras och i andra en sofistikerad och detaljerad kvantitativ analys. Metoden kan tillämpas för en anläggning men även användas som ett prioriteringsverktyg för en dammägare som har många dammanläggningar. Till exempel har US Bureau of Reclamation i USA använt sig av metoden som ett

systematiskt program med utvärderingar av dammars motståndsförmåga mot dammbrott (USBR 2018).

En tydlig fördel med felmodsanalyser som arbetssätt är att övervakningen och dammätningen på ett naturligt sätt kan kopplas till felmoderna. När felmodsförloppen analyseras är det lättare att formulera krav på specifik metodik som är lämplig för att detektera just dessa förlopp. Ett syfte med felmodsanalys är att åstadkomma effektiva och verksamma övervakningsprogram samt stödja utvärderingen av dammsäkerheten. Arbetssättet för fyllningsdammar har blivit vanligare i Sverige och en vanlig felmod som nästan aldrig kan uteslutas är inre erosion.

2.4 SYFTE MED MÄTNING

Dammägarna ansvarar för övervakningen av sina dammar. En viktig del i övervakningen utgörs av rutinmässig dammätning och visuell övervakning. Dessa utgörs av kontinuerlig automatisk datainsamling från givare, manuella mätningar, rondning, mm. Syftet med mätningen kan vara generell för att bekräfta designparametrar eller för att säkerställa att dammens allmänna status ej försämras. Syftet kan också vara mer specifikt för att övervaka till exempel en viss felmod. Oavsett vilket är det önskvärt att mätningen är utformad så att den ger en tidig varning om en verklig försämring skulle uppkomma. Det är klokt att i förväg överväga vilka resultat som förväntas samt vilka avvikelser som kräver åtgärder. Rutiner för utvärdering är nödvändigt för att förstå vad en eventuell förändring innebär.

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 klarlägga orsaken till ett avvikande förlopp.

Undersökningar för att klarlägga detta har i denna rapport benämnts incidentundersökningar. Med incident menas här således en uppkommen förändring som skulle kunna inverka menligt på dammens säkerhet. 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 till exempel ha upptäckts genom visuell observation av ett sjunkhål på dammens krön eller genom förändring av mätvärden, till exempel ett ökat läckageflöde. Andra typer av förändringar kan vara skred, deformationer, hydraulisk uppspräckning, valvbildning, sprickor, urlakad injektering, spontrelaterade problem, vittring i berg, frostpåverkan, etc.

Det ställs olika krav på mätmetoder beroende på om det är kontinuerlig övervakning eller enstaka mätningar/undersökningar. Det är därför rimligt att separera dessa. Kontinuerlig övervakning har en fördel i att det ger ökad möjlighet att studera avvikelser i tiden om den normala variationen är känd.

Undersökningar görs normalt under en kortare period och har inte denna möjlighet att erbjuda. Å andra sidan är det ofta ett avgränsat område som är målet

för en undersökning och det kan finnas bättre möjligheter att anpassa mätmetoden till specifika förutsättningar.

2.5 MÄTPARAMETRAR

För att detektera inre erosion krävs att den valda geofysiska mätmetoden har möjlighet att mäta avvikelser i de parametrar som förändras då inre erosion uppkommer. Porositeten ökar eftersom finmaterial transporteras bort. Men ökad porositet påverkar också ett flertal andra parametrar. Till exempel leder ökad porositet till minskad densitet, ökat läckageflöde, ökad permeabilitet, påverkan på temperaturen (via läckageflödet och termiska materialegenskaper), minskad seismisk gånghastighet, påverkan på dielektricitetskonstanten, påverkan på resistiviteten, mm.

Sambandet mellan de olika parametrarna är i vissa fall komplicerade eftersom de förändringar som sker kan vara ökande, minskande, ha en säsongsvariation eller vara lastberoende. Bristande kunskap om dessa samband kan medföra att tolkningen av geofysiska mätningar inte blir korrekt, och kanske är orsaken till att nyttan av mätningar med en viss metod varierar från damm till damm. Problemställningen har behandlats tidigare av Johansson et al. (1995), Johansson (1997) samt Johansson et al. (2005b), varav den sistnämnda rekommenderas för ytterligare fördjupning och bakgrund.

I de tidigare studierna framkom att de parametrar som är relaterade till läckageflöde eller förändringar i läckageflöde (t.ex. permeabilitet, temperatur, spårämne, etc.) är mer känsliga än de som är relaterade till materialegenskaper och materialförändringar (t.ex. densitet, dielektricitetskonstant, etc.). Man delade också in parametrarna i direkta/primära eller indirekta/sekundära beroende på deras koppling till inre erosion. De parametrar som direkt påverkas, t.ex. läckageflöde, porositet och finjordshalt, kan då benämnas direkta eller primära.

De flesta mätmetoder använder sig dock av indirekta eller sekundära parametrar. Man kan säga att med olika geofysiska metoder mäts det som går att mäta – inte det som önskas – och sedan översätts denna parameter till det som är intressant för en dammsäkerhetsbedömning. För att ge en ökad förståelse har vi kortfattat beskrivit och bearbetat ovan nämna studier.

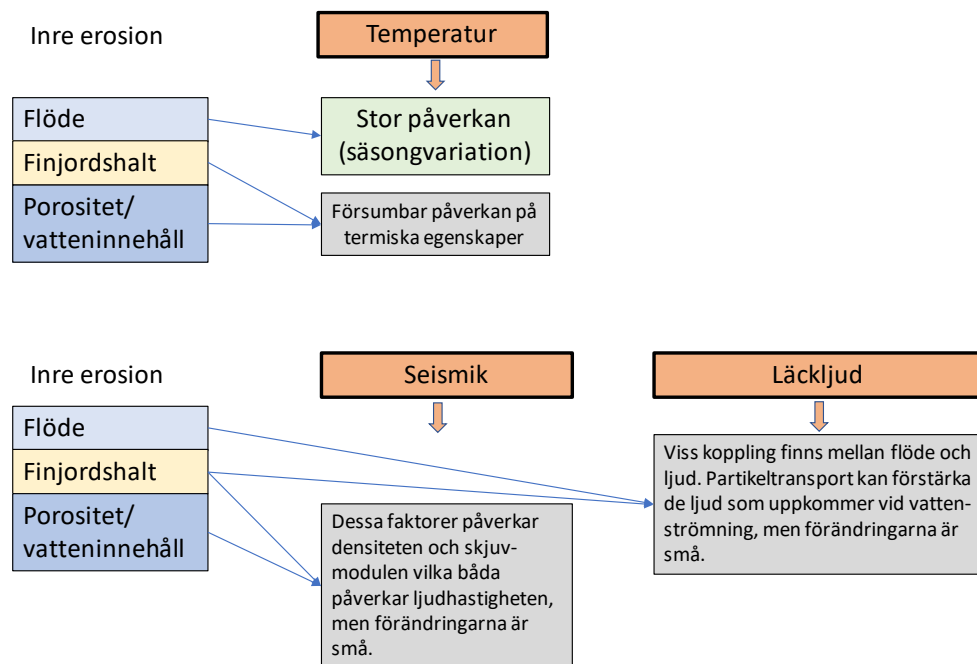
Generellt gäller att detektionsförmågan beror på hur noga man kan mäta och hur stor förändringen är. Måtnoggrannheten för olika metoder beskrivs i följande kapitel, varför endast förändringarnas storlek vid inre erosion diskuteras här. Framställningen är också begränsad till några av de metoder som beskrivs i denna studie, dvs. läckage, tryckmätning, etc. beskrivs inte.

2.5.1 Direkta/Primära mätparametrar

Vid inre erosion sker förändringar som kan upptäckas med akustiska mätningar, samt med temperaturmätningar (Figur 3). Dessa förändringar kan betraktas som direkta eftersom de responderar direkt mot en förändring av densiteten respektive flödet.

Vid mätning av temperatur kommer en ökande temperaturvariation i mätpunkten under året att uppkomma när läckageflödet ökar. Temperaturvariationen uppkommer på grund av den naturliga säsongvariationen i magasinsvattnet. Temperaturökningar eller avvikelser på upp till flera °C kan förekomma och utgör tydliga indikationer. Materialets termiska egenskaper kommer också att ändras vid förändrad porositet, vilket dock har mindre betydelse.

Temperaturen är även en viktig parameter av flera skäl, eftersom temperaturen även påverkar andra parametrar.



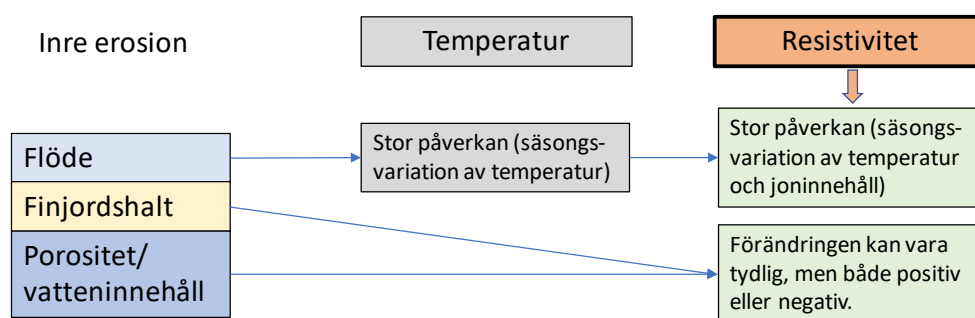
Figur 3 Respons vid inre erosion för de direkta/primära parametrarna temperatur och akustik.

Seismiska mätningar baseras på analys av ljudhastigheten i materialet. Denna beror av densitet och skjuvhållfasthet. De materialförändringar som uppkommer vid inre erosion är små (i princip ersätts fast material med vatten) och ger därför en liten påverkan av densiteten. Bland de akustiska mätningarna finns också läckljudsmätning, vars ljudstyrka beror av läckagets storlek.

2.5.2 Indirekta/Sekundära mätparametrar

Resistivitet är en materialparameter som beskriver jordmaterialets förmåga att leda elektrisk ström. I grovkorniga jordar sker ledningsförmågan huvudsakligen i vattnet medan kornskelettet ofta betraktas som en isolator. Därför är faktorer som vattenmättnad och porositet styrande. I finkorriga jordar kan kornskelettet dock inte betraktas som en isolator eftersom framför allt lerpartiklar kan transportera joner både i partiklarna och i gränsskiktet mellan lerpartiklar och porer. Lerhalten i ett jordmaterial är därför en avgörande faktor för resistiviteten. Resistiviteten i vattnet påverkas till stor del av joninnehåll, men har också ett tydligt temperaturberoende vilket kan användas för att indirekt relatera till läckageflöde.

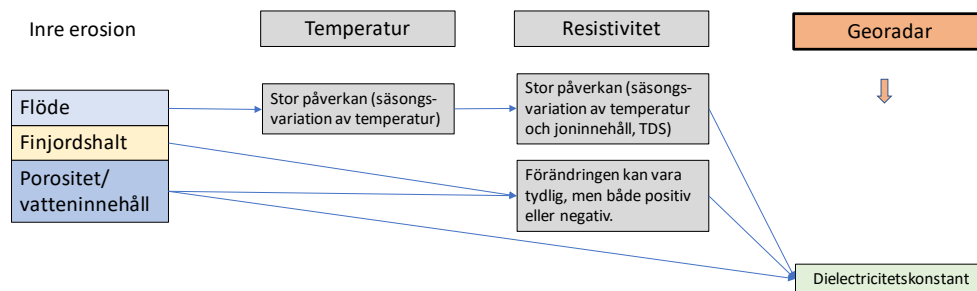
Vid inre erosion försvinner det finaste materialet och ersätts med vatten. Minskad mängd finmaterial ökar resistiviteten, men eftersom vattnets resistivitet normalt är lägre än finmaterialets kan en minskad resistivitet förväntas. Vattnets resistivitet kan dock variera och i magasin med stor del av ytvatten/ smältvatten är resistiviteten hög. I sådana fall ökar resistiviteten vid inre erosion (Figur 4). Eftersom det är möjligt att dessa effekter är lika stora, men motverkande, är det möjligt att inre erosion kan ske även om resistiviteten är konstant. En förändring av resistiviteten är dock tecken på att inre erosion pågår. Detta gäller under förutsättning att temperaturen är konstant, liksom joninnehållet i vattnet (TDS, Total Dissolved Solids).



Figur 4 Respons vid inre erosion för resistivitet (indirekt/sekundär parameter).

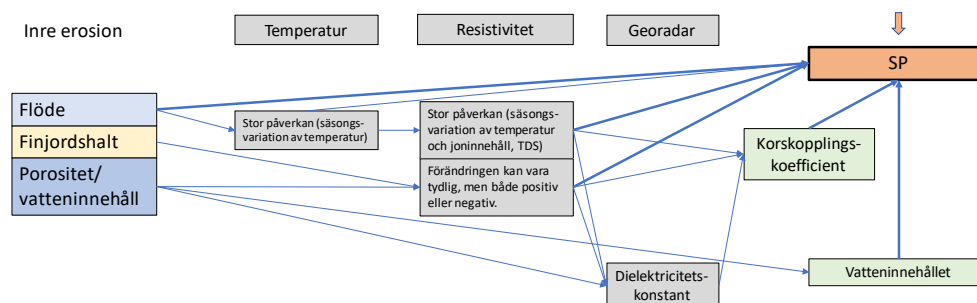
Såväl temperaturen som joninnehållet varierar i dammen. Hur stor inverkan är bestäms främst av vattenströmningen genom dammen. Variationen sker på säsongsbasis: sommar/vinter påverkar temperaturen medan fördelning mellan det grundvatten och ytvatten som tillförs magasinet varierar med nederbörd/ snösmältning. Detta medför två säsongspulser som kan motverka eller förstärka varandra. Dessa pulser passerar med olika hastighet genom dammen och kan därför motverka eller förstärka varandra. Om den säsongsmässiga resistivitetsvariationen ändras är detta dock ett tecken på att inre erosion pågår.

En annan indirekt metod är georadar, som är en elektromagnetisk metod. Metoden baseras på förändringar av dielektricitetskonstanten som förekommer i rummet (vid enstaka mätningar) och i tiden (vid jämförande mätningar). Dessa beror av vatteninnehållet i jordmaterialet i olika områden, samt resistiviteten och temperaturen. Vid inre erosion ökar vatteninnehållet, samtidigt som en förändring av resistiviteten kan uppkomma (Figur 5). Som framgått av ovanstående resonemang, samt figuren, blir sambanden mer komplexa, vilket medför ökande svårigheter att tolka mätresultatet då syftet är att följa pågående inre erosion.



Figur 5 Respons vid inre erosion för georadar (indirekt/sekundär parameter).

En annan metod är självpotential (SP), även kallad strömningspotential, vilken kan ses både som en direkt och indirekt metod. Den påverkas av hydrauliska förhållande som styrs av porositet, vattenmättnadsgrad och vattenströmning. Dessutom inverkar resistiviteten, samt den så kallade korskopplingskoefficienten, vilken är en unik parameter för SP som i sin tur påverkas av dielektricitetskonstanten, samt sådana faktorer som porernas utformning, temperatur, kemisk sammansättning av porvattnet och jordpartiklarna. Detta medför flera komplicerade samband (Figur 6) till alla de parametrar som diskuterats ovan. Den direkta kopplingen mot flödet är dock gynnsam, vilket gjort att inverkan av övriga faktorer ofta försummas vid enstaka mätningar. Detta är dock en kraftig förenkling som inte alltid är lämplig.



Figur 6 Respons vid inre erosion för SP-mätning (indirekt – direkt parameter).

Om syftet med mätningar är att upptäcka inre erosion måste därför även övriga faktorer beaktas. I samband med SP-mätning bör resistivitetsmätning göras. Eftersom SP har en direkt koppling mot flödesförändringen blir även temperaturen av betydelse. Stora temperaturvariationer ger upphov till förändring av viskositeten, vilket är en viktig faktor i detta sammanhang för strömningspotentialen.

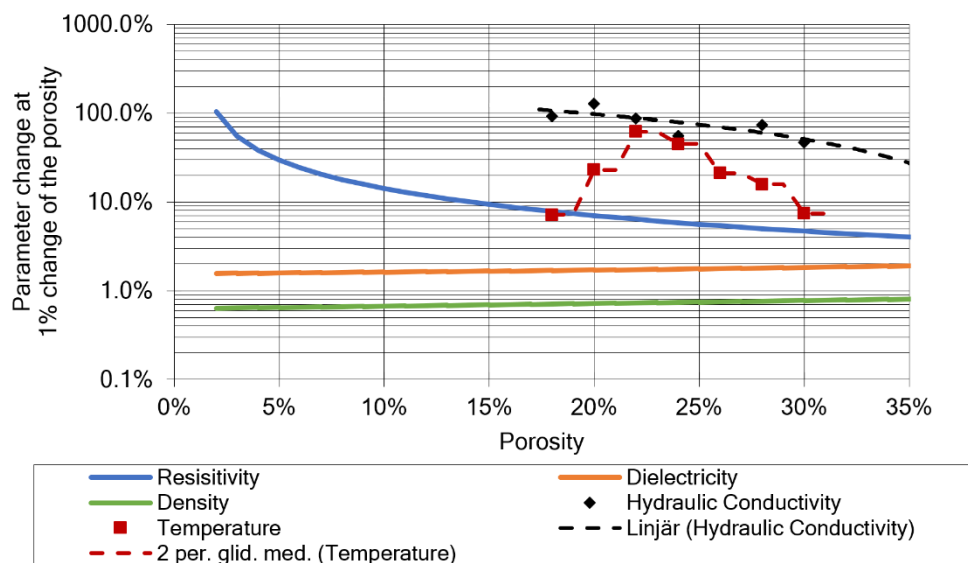
2.5.3 Flödes- eller materialberonde mätparametrar

För detektion av inre erosion kan det vara lämpligt att olika mätbara parametrar relateras till en förändrad porositet. I vissa fall finns entydiga samband, medan det

i andra fall är komplicerade samband, vilket beskrivits ovan. Hur stor relativ förändring som uppkommer vid en förändring av porositeten med en procentenhet redovisades av Johansson et al. (1995) och har modifierats i Figur 7. Figuren baseras på förenklade antaganden och noggrannheten i de redovisade sambanden är därför inte likvärdig, varför figuren bör tolkas kvalitativt. Det som tydligast framgår av figuren är att de flödesberoende mätparametrarna (hydraulisk konduktivitet och temperatur) i detta fall ger 10 till 100 gånger större respons än de materialberoende parametrarna (densitet och dielektricitetskonstant).

Figuren belyser inte alla de parametrar som är aktuella eller alla kopplingar till inre erosion. Som framgått tidigare påverkas exempelvis korskopplingskoefficienten både av material- och strömningsrelaterade parametrar. Likaså har resistiviteten en flödesberoende komponent (temperatur) som förbättrar metodens möjlighet att upptäcka pågående inre erosion vid kontinuerlig mätning.

Förändringens storlek måste ställas i relation till hur noggrant man kan mäta, samt vilken rumslig upplösning metoden ger. En känslig metod med hög upplösning kan därvid kompensera för en svag förändring.



Figur 7 Olika mätparametrars relativa förändring vid förändring av porositeten med en procentenhet. Materialberoende parametersamband visas med linjer medan strömningsberoende visas som diskreta punkter och streckade linjer (bearbetad efter Johansson et al. 1995).

2.6 SKADETYPER OCH MÄTPARAMETRAR

I denna rapport har en tonvikt lagts på inre erosion då det är en viktig frågeställning och där det finns ett stort behov av nya mätmetoder. Men det finns ett stort antal andra frågeställningar där olika metoder kan tillämpas. Några av dessa diskuterades av Johansson et al. (1995) och visas i

Figur 8. De skadetyper, inbyggda fel och yttre påverkan grundar sig på incidentstatistik från ICOLD och representerar relevanta dammsäkerhetsfrågeställningar.

Situationen i verkligheten är mer komplicerad än tabellen ger uttryck för. Ofta uppkommer dessa händelser i kombination och ofta påverkas flera parametrar indirekt (vilket diskuterats i föregående avsnitt).

Baserat på tabellen kan relevanta parametrar identifieras. Ingen värdering anges dock av hur stor påverkan som förväntas eller vilka metoder som kan användas. Det avgörs av ett flertal faktorer, t.ex. hur parametern mäts, dess noggrannhet och upplösning. Johansson et al. (1995) går mer på djupet och ger viss vägledning.

Primära indikations- parametrar	Rörelser	Portryck	Flöde	Vattenkvalitet	Temperatur	Spänningar	Sprickvidd	Densitet	Porositet	Hydraulisk konduktivitet	Korngradering	Ljud
Skadetyper, inbyggda fel, yttre påverkan												
1. Skred	X	X	-	-	-	X	X	-	-	-	X	X
2. Deformationer, horisontellt och vertikalt	X	-	-	-	-	X	X	X	X	-	-	X
3. Hydraulisk <u>uppspräckning</u>	-	X	X	X	X	X	-	X	X	X	-	X
4. Inre erosion, <u>piping</u>	X	X	X	X	X	X	-	X	X	X	X	-
5. Sprickor i berggrunden	X	X	X	X	X	X	X	-	-	X	-	X
6. <u>Injekteringskvalitet</u>	-	X	X	X	X	-	-	X	X	X	X	X
7. Spontfunktion	-	X	X	X	X	X	-	X	X	X	X	X
8. <u>Inhomogeniteter</u>	-	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
11. Frostsador	X	-	-	-	X	X	-	X	X	X	X	-
12. <u>Ytererosion</u>	X	-	-	-	-	-	-	-	-	-	X	-
13. Överströmning av <u>tätkärnan</u>	X	X	X	X	-	-	-	X	X	-	X	-
14. Erosion av <u>dammtå</u>	X	-	X	-	-	-	-	-	-	-	X	-
15. Sönderfall	-	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	-

Figur 8 Sammanställning över skadetyper och tillhörande parametrar som påverkas vid en förändring i dammen (bearbetad efter Johansson et al. 1995).

3 Mätmetoder

En genomgång av mätmetoder har gjorts. För varje metod redogörs kort för metodbeskrivning och fysikalisk princip, praktiskt tillvägagångssätt, utvärderingsmetodik, möjligheter och begränsningar. För en del av metoderna har en utökad metodbeskrivning redovisats i bilagor. För ytterligare detaljer om geofysik i allmänhet och de olika metoderna i synnerhet hänvisas till litteratur i ämnet (t.ex. Styles 2012; Reynolds 2011; Knödel et al. 2007; Butler 2005).

För varje metod eller grupp av metoder har en kort bedömning utförts av lämpligheten för dammsäkerhetstillämpningar. Denna redovisas i tabellform och har delats upp i fyra del områden; (i) fysikaliska grundförutsättningar och praktisk genomförbarhet, (ii) erfarenheter från svenska förhållanden, (iii) erfarenheter internationellt och (iv) utvecklings- och förbättringspotential. En relativ bedömning i tre olika nivåer har gjorts för varje delområde och en sammanvägd bedömning.

Ett antal metoder har relativt snabbt bedömts vara mindre lämpliga för dammtillämpningar. Har ingen nämnvärd utveckling skett och inga nya erfarenheter finns, har beskrivningen gjorts mycket kort baserat på tidigare rapport (Johansson et al. 1995).

3.1 TEMPERATURMÄTNING

Principen för temperaturmätning i dammar är att temperaturen i en given punkt i dammen påverkas av vattenströmningen genom dammen. Vid stor vattenströmning blir temperaturvariationen större än vid låg vattenströmning. Vid ökat läckage kommer temperaturvariationen att öka. Temperaturmätningar kan användas både för övervakning och undersökning av dammar. Metoden beskrivs utförligare i *Bilaga A* samt av Johansson (1997) samt Johansson & Sjödahl (2009).

Baserat på denna princip används metoden idag på frekvent i Sverige. Mätning görs kontinuerligt eller regelbundet med optiska fiber i ett stort antal dammar (Johansson & Sjödahl 2017). Punktvisa mätningar, automatiskt eller manuellt görs i några tiotal dammar och temperaturlinor för mätning i vertikala profiler finns i några dammar.

Internationellt är tekniken inte tillämpad i lika hög grad, möjligen med undantag av Tyskland och i viss mån Frankrike och Kanada. Enstaka installationer finns i USA, Brasilien, Kina, Laos, Spanien, England, Nederländerna, Polen m.fl. Forskning och utveckling pågår i flera av dessa länder. En variant av metoden, ofta kallad "aktiv metod", har använts internationellt. Då tillförs värme och den temperaturrespons som uppkommer analyseras (Perzlsmaier et al. 2007). Motsatt benämns metoden ibland för "passiv" i de fall den baseras på naturligt förekommande temperaturvariationer och ingen värme tillförs

En närliggande teknik är värmekamera, baserade på IR-teknik. Tekniken beskrivs t.ex. i FEMA (2015, sid 6-27) där också ett antal referenser ges till publikationer där tekniken använts på dammar. Teknikutvecklingen har varit påtaglig under senare år. Kameran kan användas med fast montering riktad mot dammens nedströmsdel eller placerad i en drönare som passerar över dammen. Denna metod är mest lämpad för att detektera utströmningsområden på dammens nedströmsida, eller i öppna diken. Dessa förutsättningar kan möjligen förekomma på låga homogena invallningsdammar, medan normala fyllningsdammar är utformade så att vattenströmningen samlas upp i dränerande lager, eller i dränagesystemet.

Tabell 1 Bedömning av temperaturmätning beträffande lämplighet för dammsäkerhetstillämpningar.

Aspekt	Temperaturmätning
Fysikaliska grundförutsättningar	Utmärkt
Praktisk genomförbarhet	Utmärkt
Erfarenheter svenska förhållanden	Utmärkt
Erfarenheter internationellt	Utmärkt
Utvecklings- och förbättringspotential	Utmärkt
Sammanvägt omdöme	Utmärkt

3.2 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 Hz eller mindre.

Man kan dela in geofysiska metoder i passiva och aktiva metoder. Självpotential-metoden (SP) är en passiv metod då man mäter naturligt alstrade potentialer. Resistivitetmetoden 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 finns i dammen, exempelvis stålrör för porttrycksmätningar. Dessutom krävs galvanisk kontakt med marken, vilket i vissa fall kan vålla problem och vara tidsödande att säkerställa. Till fördelarna hör att det finns en direkt eller indirekt koppling mellan flöde och vattenkvot och de elektriska fälten. Vidare är metoderna väl lämpade för kontinuerlig övervakning med hjälp av permanent installerade elektroder.

3.2.1 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 (Reynolds 2011; Corwin 1990). För avancerad tolkning av data m.h.a. inversmodellering och finita

elementmetoden krävs kännedom om resistivitetsfördelningen i materialet samt topografin (Ikard et al. 2014; Thompson et al. 2012; Bolève et al. 2009).

Genom den direkta kopplingen till vattenströmning har metoden stor potential, såväl för tillståndskontroll med handburen utrustning som för övervakning med fast installerade elektroder. Metoden är beskriven mer utförligt i *Bilaga B*.

3.2.2 Resistivitet, ERT

Resistivitetmetoden bygger på galvanisk mätning av markens resistivitet, eller specifika motstånd, vilket sker genom att sända en ström mellan två elektroder och mäta uppkomna potentialer mellan två andra elektroder. Resistiviteten beror i huvudsak av vatten- och finmaterialinnehåll i marken, samt vattnets joninnehåll. En zon med förhöjt läckage kan på så vis registreras genom det ökade vatteninnehållet eller den minskande finmaterialhalten. Olika djupnedträngning uppnås genom att variera elektrodavståndet, och mätning med många olika elektrodavstånd längs en linje eller över en yta kan användas för att skapa modeller i 2D respektive 3D (Binley 2015; Loke et al. 2013; Reynolds 2011; Seidel & Lange 2007).

Metoden har stor potential för både tillståndskontroll och övervakning, det senare med hjälp av fast installerade elektroder (Lin et al. 2014; Johansson et al. 2005c; Sjö Dahl et al. 2008; Johansson & Dahlin 1996). Dahlin et al. (2008) har sammanställt en guide för tillståndskontroll och övervakning av fyllningsdammar med resistivitetsundersökning. Metoden är beskriven mer utförligt i *Bilaga C*.

3.2.3 Inducerad Polarisation, IP

IP-metoden bygger på galvanisk mätning av resistivitetsens frekvensberoende, och är således en utvidgning av resistivitetmetoden. IP-effekterna kan förklaras med elektrokemiska fenomen i marken, och variationer i IP-egenskaper kan under vissa förutsättningar kopplas till hydrauliska egenskaper. Mätningarna kan utföras i frekvensdomän eller tidsdomän, där det senare kan göras med instrument för resistivitmätning (Reynolds 2011; Binley 2015).

Försök med så kallade spektrala IP-data, dvs. med brett tids- eller frekvensinnehåll, från såväl laboratorie- som fältskala har visat potential för kvantifiering av hydrauliska egenskaper (Maurya et al. 2018).

Metoden är mer störningskänslig än resistivitetsundersökning men bedöms ha potential för dammtillämpningar, i synnerhet övervakning med hjälp av fast installerade elektroder. Metoden är beskriven mer utförligt i *Bilaga D*.

3.2.4 Bedömning av elektriska metoder

De galvaniska elektriska metoderna ger mätresultat som kopplar till flöde, hydrauliska egenskaper samt förändringar i materialegenskaper. De påverkas av elektriska störsignaler, men dessa går i hög grad att hantera genom sättet att mäta på. Isolerade elektriska ledningar är sällan problematiska, men ledande objekt i galvanisk kontakt med dammen kan vara det. Geometrin hos fyllningsdammar kan i vissa fall ge stora fel i modelltolkningen, vilket man måste vara medveten om

vid användning av resultaten för att undvika feltolkning. Ett försök att sammanfatta lämpligheten för tillämpning på fyllningsdammar har gjorts i tabellen nedan.

Tabell 2 Bedömning av elektriska metoder beträffande lämplighet för dammsäkerhetstillämpningar. Bedömningsklasser Utmärkt/Bra/Mindre bra eller Saknas i de fall inga relevanta erfarenheter har påträffats.

Aspekt	Självpotential (SP)	Resistivitet	Inducerad polarisation (IP)
Fysikalisk grundförutsättning	Utmärkt	Utmärkt	Utmärkt
Praktisk genomförbarhet	Bra	Utmärkt	Bra
Erfarenheter svenska förhållanden	Mindre bra	Utmärkt	Saknas
Erfarenheter internationellt	Bra	Utmärkt	Saknas
Utvecklings- och förbättrings-potential	Bra	Utmärkt	Utmärkt
Sammanvägt omdöme	Bra	Utmärkt	Utmärkt

3.3 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 materialets packningsgrad, cementering, vattenmättnad, samt om materialet är uppsprucket eller vittrat. I gränssytorna 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. S-vågor har fördelen att det ger kortare våglängd och därmed bättre geometrisk upplösning, och det ger också resultat som inte är känsliga för variation i vatteninnehållet i materialet. Studier av ytvågor, främst Rayleigh-vågor, behandlas under rubriken ytvågsseismik.

För refraktions-, reflektions- och ytvågsseismik alstras vågorna med hjälp av sprängämne, fallvikt, slägga eller vibrator, beroende på tillämpning och förutsättningar. Gällande ytvågsseismik är det också möjligt att göra så kallad passiv seismik genom att använda olika typer av brus som signalkälla, t.ex. från trafik, vågor, maskiner, etc.

Signalerna registreras på land vanligtvis med geofoner, idag ofta monterade med fasta avstånd på ett kraftigt textilband så att hela uppställningen enkelt kan flyttas längs en undersökningslinje, s.k. släpseismik. Oftast använd geofoner som

registrerar den vertikala komponenten, men det finns också horisontal- och flerkomponentsgeofoner. För undersökningar i vatten används hydrofoner, som är tryckkänsliga och därmed kan registrera P-vågor men inte S-vågor. Det är också möjligt att registrera de seismiska signalerna med optisk fiber som sensor (Parker et al. 2012; Miller et al. 2012), vilket skulle kunna öppna intressanta möjligheter eftersom det finns optisk fiber installerad i många dammar. Inledande tester har utförts på en fyllningsdamm, men det är för tidigt att avgöra om tillräcklig upplösning kan uppnås för tillämpning på fyllningsdammar.

3.3.1 Refraktionsseismik

Refraktionsseismik bygger på registrering av utbredningshastigheten för elastiska vågrörelser i marken. Metoden bygger på att första ankomsten för P-vågen identifieras, vilket är antingen direktvågen eller en refrakterad våg. En grundförutsättning för de traditionella tolkningsmetoderna är att hastigheterna ökar mot djupet, men avvikelser från detta kan delvis hanteras m.h.a. så kallad refraktionsseismisk tomografi (Reynolds 2011; Schuck & Lange 2007; Sjögren 1984).

Refraktionsmetoden kan användas för att översiktligt lokalisera dåligt kompakterade delar i en fyllningsdamm, sprickor i omgivande berg och andra porösa och vattenfyllda svaghetszoner. Metoden är väl lämpad som förundersökningsmetod för att lokalisera lämpliga dammlägen. För lokalisering av defekter i själva dammen finns försök gjorda där det inte gick att hitta defekter m.h.a. P-vågor medan det var framgångsrikt med S-vågor (Hayles et al. 2005).

Refraktionsseismik är med traditionell teknik mindre lämpligt för övervakning. Metoden är beskriven mer utförligt i *Bilaga E*.

3.3.2 Reflektionsseismik

Reflektionsseismik bygger på registrering av reflektionsvågor från olika horisonter i undergrunden. 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. Det är likväl svårt att få tillräcklig upplösning med reflektionsseismik med P-vågor. Genom att istället alstra och registrera S-vågor, som har långsammare utbredningshastighet, kan man förbättra upplösningen (Reynolds 2011; Schuck & Lange 2007).

Reflektionsseismik med S-vågor skulle kunna ge en bild av en fyllningsdamms inre struktur vid tillståndskontroll för större dammar. Metodens potential för kontinuerlig övervakning bedöms som liten.

3.3.3 Ytvågsseismik

Ytvågsseismik bygger på registrering av ytvågor och analys av deras frekvensinnehåll. Ytvågor är dispersiva, vilket innebär att vågor med olika frekvens breder ut sig med olika hastighet. Ytvågornas utbredningshastighet är indirekt relaterad till markens fasthet och densitet, och metoden används för bestämning av skjuvmodulen. Ytvågens frekvens avgör dess djupnedträngning, där lägre frekvens ger större djupnedträngning och vice versa. Ytvågor har betydligt större

energiinnehåll än andra typer av akustiska vågor, och olika typer av signalkällor inklusive brus kan användas, vilket gör att metoden är mindre störningskänslig än andra seismiska metoder (Socco & Strobbia 2004; Park et al. 1999).

Metoden har potential för upplösning av diffusa förändringar av packningsgrad och densitet för tillståndskontroll av fyllningsdammar (Cardarelli et al. 2014). Dock finns det en betydande risk för att metoden har svårt att hantera den geometriska uppbyggnaden hos fyllningsdammar då den avviker alltför mycket från antagandet om 1D struktur (Bièvre et al. 2017), detta gäller i synnerhet typiska svenska dammar med tätkärna. Metoden är beskriven mer utförligt i *Bilaga F*.

3.3.4 Ekolod/Sonar

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 gränssytor. I marken består gränssytor 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.

3.3.5 Läckljudsmätning

Principen för läckljudsmätning är att snabbt strömmande vatten ger upphov till ett mätbart brus. Detta har studerats av bl.a. Koerner et al. (1976, 1979 och 1981), Buck & Watters (1986), Hung et al. (2009) samt Boleve et al. (2012).

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. Mätning kan göras med optiska fibrer.

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. Denna metod kräver fasta installationer och har därför störst potential för övervakning.

3.3.6 Övriga seismiska metoder

Borrhålsseismik utförs genom generering av seismiska signaler i ett borrhål och mottagning i ett annat borrhål. Ofta byts plats på signalkälla och sensorer så att sändning och mottagning av signalerna möjliggörs i båda borrhålen. Genom att analysera hur de seismiska signalerna fortplantar sig mellan borrhålen, t.ex. med hjälp av s.k. strålgångsanalys eller inversmodellering, bygger man upp sektioner av hastighetsfördelningen i materialet (Reynolds 2011; Paillet & Ellefsen 2005). En fördel med metoden är att den möjliggör hög upplösning på djupet. En begränsning i dammtillämpning är att man generellt inte vill borra i tätkärnan.

En liknande undersökningsteknik är att mäta genom dammen, genom att placera signalkällan på nedströmssidan och geofonerna på uppströmssidan, eller vice versa, s.k. "through the dam seismics". Denna teknik har testats i full skala och då

givit lovande resultat. Man kan använda både P-vågor och S-vågor, där det finns för och nackdelar med respektive vågtyp. P-vågor är lättare att generera, vilket gör utrustningen enklare att använda och billigare, men resultatet kan påverkas mycket av vattenhalten i materialet. Generering av S-vågor kräver specialutrustning som är mera komplicerad att använda, men ger mera robusta resultat även om vatteninnehållet varierar i tid och rum (Gaffran & Jefferies 2005).

Vertikal seismisk profilering (VSP) utförs mellan ett borrhål och markytan, med vars hjälp man kan bestämma de seismiska hastigheterna längs borrhålet. Man har då en eller flera sensorer i borrhålet och en eller flera skottpunkter på markytan, eller vice versa (Reynolds 2011; Paillet & Ellefsen 2005).

3.3.7 Bedömning av akustiska metoder

Akustiska metoder kan ge viktiga bidrag vid undersökningar i dammar, med resultat som kopplar till förändringar i porositet och täthet.

Det är viktigt att undersökningen anpassas efter syfte och förutsättningar. Det kan t.ex. vara problematiskt att få bra koppling mellan signalkälla och sensorer å ena sidan, och undersökningsobjektet å andra sidan, på fyllningsdammar. Detta kan tillsammans med signalstörningar från t.ex. anläggningen, trafik och vågor göra det svårt att uppnå tillräckligt bra signalkvalitet för en del av metoderna. Ett annat problem är att det kan vara svårt för tolkningsmetoderna att hantera den speciella geometrin hos typiska fyllningsdammar, och att resultatet därför riskerar bli svårtolkat eller vilseledande om man inte tar hänsyn till det. Metodutvecklingen de senaste åren möjliggör dock att komplexa geometrier, med slumpmässiga positioner för sensorer och skottpunkter, kan hanteras med 3-D inversmodellering. Sådan programvara är dock inte tillgänglig för rutinmässig användning, och den kan ställa stora krav på specialistkompetens och beräkningskapacitet hos användaren. Vidare kvarstår det att tillförlitliga utvärderingar kräver användning av kraftiga energikällor vilket potentiellt kan riskera dammsäkerheten.

Flera av metoderna är väl lämpade för undersökningar med avseende på möjliga problemzoner i undergrunden uppströms och nedströms dammen. Erfarenheterna är dock små eftersom metoderna inte använts i någon större utsträckning.

Tabell 3 Bedömning av akustiska metoder beträffande lämplighet för dammsäkerhetstillämpningar. Bedömningsklasser Utmärkt/Bra/Mindre bra eller Saknas i de fall inga relevanta erfarenheter har påträffats.

Aspekt	Refrakt. - seismik	Reflekt. -seismik	Ekolod/ Sonar	Ytvågs-seismik	Läckljuds-mätning
Fysikalisk grundförutsättning	Bra	Mindre bra	Mindre bra	Bra	Bra
Praktisk genomförbarhet	Bra	Mindre bra	Mindre bra	Mindre bra	Bra
Erfarenheter svenska förhållanden	Mindre bra	Mindre bra	Saknas	Saknas	Saknas
Erfarenheter internationellt	Mindre bra	Mindre bra	Mindre bra	Mindre bra	Saknas
Utvecklings- och förbättringspotential	Bra	Mindre bra	Bra	Bra	Bra
Sammanvägt omdöme	Bra	Mindre bra	Mindre bra	Bra	Bra

3.4 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 (konduktivitet, σ) eller radiovågshastighet (som beror av relativ dielektricitetskonstant, ϵ_r). Översatt till jordartsparmetrar är det avvikelser i kornstorlek och vattenkvot som utgör diskontinuiteter, samt innehåll av joner.

Mätning utförs normalt från markytan, men kan även användas för borrhållstillämpningar. Principen för borrhållsradar är att en elektromagnetisk signal skickas ut i jorden från en antenn i ett borrhål infordrat 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 är beskriven mer utförligt i *Bilaga G*.

Metoden har stor potential för tillståndskontroll, där t.ex. avvikelser i tåtkärnans struktur i de övre delarna som kan tyda på djupare liggande problem kan detekteras (Carlsten et al. 1995). Vidare kan defekter bakom erosionskydd lokaliseras i vissa fall (Pueyo Anchuela et al. 2018). Metoden lämpar sig sämre för automatiserad övervakning.

Tabell 4 Bedömning av georadar beträffande lämplighet för dammsäkerhetstillämpningar. Bedömningsklasser Utmärkt/Bra/Mindre bra eller Saknas i de fall inga relevanta erfarenheter har påträffats.

Aspekt	Georadar/borrhålsradar
Fysikaliska grundförutsättningar	Utmärkt
Praktisk genomförbarhet	Utmärkt
Erfarenheter svenska förhållanden	Utmärkt
Erfarenheter internationellt	Utmärkt
Utvecklings- och förbättringspotential	Bra
Sammanvägt omdöme	Utmärkt

3.5 INDUKTIVA ELEKTROMAGNETISKA METODER

Elektromagnetiska metoder kan delas in i induktiva metoder, t.ex. VLF, slingram och TEM, samt reflektionsmetoder, såsom georadar. En gemensam fördel är att det inte behövs någon galvanisk kontakt med marken, med undantag av några varianter på metoden där man kombinerar induktiv mätning i spolar med att sända ut eller mäta signaler mellan elektroder med markkontakt. En avgörande svaghet för alla induktiva elektromagnetiska metoder är att de är känsliga för mätstörningar orsakade av installationer såsom elkablar, metallstaket, sponter, armerad betong, etc. Eftersom det i allmänhet krävs ett avstånd på omkring 100 m för att komma ifrån störningarna utgör detta en avgörande begränsning på många fyllningsdammar, där det ofta finns belysning och metallräcken installerade längs dammkrönet.

Induktiva elektromagnetiska undersökningsmetoder registrerar skillnader i elektriska egenskaper hos olika marklager (konduktivitet, σ). Konduktiviteten 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.

3.5.1 Very Low Frequency, 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. Namnet kommer av Very Low Frequency p.g.a. att frekvensen är låg i radiosammanhang (Reynolds 2011).

Metoden bedöms ha liten potential för undersökningar av dammar, medan viss potential finns för lokalisering av eventuella läckagevägar under dammen på nedströmssidan.

3.5.2 Radio magneto-tellurik, RMT

Radio magneto-tellurik (RMT) bygger på detektering av inducerade elektromagnetiska fält, där man utnyttjar avlägsna radiosändare som signalkälla. Genom att mäta både det magnetiska fältet m.h.a. spolar, på samma sätt som för VLF-metoden, och det elektriska fältet med hjälp av en markantenn med elektroder kan markens resistivitet bestämmas. Genom att mäta i flera olika frekvenser får man olika mätdjup. Metoden är lämpad för lokalisering av zoner med kraftigt avvikande elektriska egenskaper, exempelvis krosszoner i berg. Undersökning med RMT kan utföras på land såväl som på vatten. RMT är en variant av magneto-tellurik (MT) där man använder höga frekvenser, typiskt 15–250 kHz (Bastani 2001). Metoden VLF-Resistivitet (VLF-R) är liktydigt med RMT med en enda frekvens.

Metoden bedöms ha liten potential för undersökningar av dammar. Viss potential finns för lokalisering av eventuella läckagevägar under dammen genom undersökningar uppströms och nedströms dammen.

3.5.3 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 (Reynolds 2011).

Metoden bedöms ha liten potential för undersökning av typiska svenska dammar, dock kan den vara användbar för skanning av långa fördämningar längs t.ex. floder och kanaler (Sentenac et al. 2018). Viss potential finns för lokalisering av eventuella läckagevägar under dammen på nedströmssidan.

3.5.4 Transient elektromagnetisk sondering, TEM

Principen för transient elektromagnetisk sondering (TEM) är att en induktiv elektromagnetisk puls sänds ner i marken. Pulsen alstras genom att man sänder korta strömpulser i en kabelslinga (spole) som ofta är rektangulär, och vars storlek kan variera från få meter till hundratals meter i sida. När strömmen i spolen stängs av alstras ett elektromagnetiskt fält, vars avklingning man mäter upp med hjälp av en mindre spole. Genom analys av avklingningen kan markens resistivitetsfördelning mot djupet bestämmas (Reynolds 2011).

Det finns även instrument som bygger på TEM som är specialdesignade för detektering av metallobjekt (t.ex. Geonics EM61). Dessa har sändar- och mottagarspoler i storleksordningen 0,2 till 1 m monterade på en stång eller på hjul för att lätt kunna förflyttas över undersökningsområdet. Metoden registrerar avvikelser, s.k. anomalier, över metallobjekt i marken.

TEM-undersökning för kartering av markans resistivitetsfördelning bedöms som följd av bl.a. störningskänsligheten ha liten potential för undersökningar av dammar. Metalldetektorer baserade på TEM kan dock vara värdefulla för att lokalisera icke-dokumenterade metallobjekt i marken, eller verifiera dokumenterade konstruktioner. Vidare kan de vara värdefulla som en del i ett

undersökningspaket tillsammans med andra geofysiska metoder, eftersom de ger stöd för tolkningen av data från elektriska och andra elektromagnetiska metoder.

3.5.5 Magnetisk resonanssondering, MRS

Principen för magnetresonanssondering (MRS) är att ett sinusformat växelfält sänds ut med hjälp av en kabelslina (spole) med en mätuppställning som liknar den för TEM. Frekvensen anpassas efter det lokala jordmagnetiska fältets styrka, så att det överensstämmer med vattenmolekylernas resonansfrekvens och dessa sätts i svängning. De fält som induceras av vattenmolekylernas svängningar mäts upp och ger ett mått på vatteninnehållet i marken. Genom att variera styrkan på den utsända strömmen varierar man djupnedträngningen (Reynolds 2011).

Metoden bedöms ha liten potential för undersökningar av dammar p.g.a. att den är mycket känslig för elektromagnetiska störningar.

3.5.6 Elektromagnetisk profilering

Principen för denna metod är att en elektrisk ström alstras med strömelektroder i marken. En vattenförande zon har bättre elektrisk ledningsförmåga än omgivande material vilket gör att en förstärkning av den elektriska strömmen uppstår i zonen. Denna förstärkning ger upphov till avvikelser i magnetfältet, vilka kan mätas med känsliga instrument på markytan (Montgomery & Kofoed 2007).

En användning av denna metod är AquaTrack™ utvecklat av Willowstick (2018). Mätning av magnetfältet sker över ett större område. Vid utvärdering upprättas en responskarta genom att det uppmätta magnetfältet divideras med ett beräknat magnetfält, vilket är baserat på en homogen modell. Därigenom framträder avvikande zoner. Områden med starkare magnetfält än beräknat indikerar högre vattenströmning. Eftersom mätning bara utförs på ytan är det svårt att identifiera på vilken nivå vattenströmning sker genom att bara använda sig av responskartan. Därför skapas en tredimensionell modell av dammen och en inversionsalgoritm används för att passa in mätdata med det elektriska fältet i tre dimensioner.

Metoden har använts på dammar internationellt med varierande resultat, medan svenska erfarenheter är relativt begränsade. En nyligen presenterad studie där metoden bidrog till att hitta en läckageväg har beskrivits av Hughes et al. (2018).

3.5.7 Bedömning av induktiva elektromagnetiska metoder

Induktiva elektromagnetiska metoder kan under de förhållanden som råder vid svenska dammar ofta inte förväntas ge användbara resultat p.g.a. att det förekommer elektriskt ledande installationer såsom elnätsansluten belysning och andra elektriska installationer, metallräcken, etc. som stör ut metoderna. Flera av metoderna kan vara användbara för att lokalisera potentiella läckagevägar uppströms eller nedströms dammen. En annan begränsning vid svenska förhållanden är att induktiva metoder generellt är dåliga på att bestämma egenskaperna i högresistiva geologiska miljöer, vilka är vanligt förekommande.

Tabell 5 Bedömning av induktiva elektromagnetiska metoder beträffande lämplighet för dammsäkerhetstillsämpningar. Bedömningsklasser Utmärkt/Bra/Mindre bra eller Saknas i de fall inga relevanta erfarenheter har påträffats.

Aspekt	VLF	RMT	Sling- ram	TEM	TEM metall- detekt.	MRS	EM profil- ering
Fysikaliska grundförutsättningar	Mindre bra	Utmärkt	Bra	Mindre bra	Utmärkt	Utmärkt	Utmärkt
Praktisk genomförbarhet	Mindre bra	Mindre bra	Mindre bra	Mindre bra	Utmärkt	Mindre bra	Mindre bra
Erfarenheter svenska förhållanden	Saknas	Saknas	Saknas	Saknas	Saknas	Saknas	Saknas
Erfarenheter internationellt	Saknas	Saknas	-	Saknas	Saknas	Saknas	Bra
Utvecklings- och förbättringspotential	Liten	Liten för dammar	Liten	Liten för dammar	Liten (mogen metod)	Liten för dammar	Oklart
Sammanvägt omdöme	Mindre lämplig	Mindre lämplig	Mindre lämplig	Mindre lämplig	Bra	Mindre bra	Bra

3.6 MAGNETISKA METODER

Magnetiska metoder bygger på passiv uppmätning av variationer i det jordmagnetiska fältet. Olika geologiska material har olika magnetisk susceptibilitet, vilket påverkar det lokala magnetfältet, och magnetiska mätningar används ofta för berggrundskartering. Även olika antropogena material såsom metall med ferritinnehåll och bränt material såsom t.ex. tegel har avvikande magnetiska egenskaper och påverkar därigenom det lokala magnetfältet (Reynolds 2011).

Magnetiska undersökningar utförs som totalfältsmätningar eller gradientmätningar. Det senare kan t.ex. göras genom att mäta med två sensorer på olika höjd, för att bestämma den vertikala gradienten genom att beräkna skillnaden mellan dessas resultat. Metoden är snabb och därmed billig.

Magnetiska metoder bedöms ha liten potential för tillståndskontroll av fyllningsdamm. En möjlig tillsämpning är dock gradientmätning för lokalisering av metallobjekt. En annan möjlig tillsämpning är för att ge kompletterande information om variationer i berggrundstyp och struktur uppströms och nedströms dammen, i samband med underökning av tänkbara läckagevägar eller stabilitetsbedömningar.

Tabell 6 Bedömning av magnetiska metoder beträffande lämplighet för dammsäkerhetstillämpningar. Bedömningsklasser Utmärkt/Bra/Mindre bra eller Saknas i de fall inga relevanta erfarenheter har påträffats.

Aspekt	Magnetiska metoder (totalfält/gradient)
Fysikaliska grundförutsättningar	Mindre bra
Praktisk genomförbarhet	Mindre bra
Erfarenheter svenska förhållanden	Saknas
Erfarenheter internationellt	Saknas
Utvecklings- och förbättringspotential	Mindre bra
Sammanvägt omdöme	Mindre bra

3.7 GRAVIMETRISKA METODER

Principen för gravimetri är noggrann uppmätning av variationer i tyngdkraftsfältet, vilka kan relateras till variationer i t.ex. bergartstyp, berggrundstopografi, förekomst av håligheter i marken, etc. Metoden kräver mycket hög noggrannhet i samband med fältmätningarna, och omfattande korrigeringar av mätdata för att få tolkbara resultat (Reynolds 2011).

Gravimetri bedöms ha begränsad potential för undersökning och övervakning av dammar då de samlade förändringarna i densitet till följd av inre erosion sällan kan förväntas leda till detekterbara anomalier. Ett undantag skulle kanske kunna vara långt gånge inre erosion innan sjunkhål öppnar sig. Metoden har dock potential för att lokalisera icke-dokumenterade tunnlar och konstruktioner under mark genom s.k. mikrogravimetri. Vidare kan den vara ett värdefullt verktyg för att lokalisera karst i områden med risk för det.

Tabell 7 Bedömning av gravimetriska metoder beträffande lämplighet för dammsäkerhetstillämpningar. Bedömningsklasser Utmärkt/Bra/Mindre bra eller Saknas i de fall inga relevanta erfarenheter har påträffats.

Aspekt	Gravimetriska metoder
Fysikaliska grundförutsättningar	Mindre bra
Praktisk genomförbarhet	Mindre bra
Erfarenheter svenska förhållanden	Saknas
Erfarenheter internationellt	Saknas
Utvecklings- och förbättringspotential	Mindre bra
Sammanvägt omdöme	Mindre bra

3.8 ÖVRIGA METODER

3.8.1 Geofysisk borrhålsloggning

De flesta metoder som beskrivits ovan kan också utföras i borrhål genom att man sänker ner olika typer av mätprober. Det finns prober som mäter temperatur, vätskekonduktivitet, resistivitet (galvaniskt), konduktivitet (induktivt), seismisk hastighet, magnetiska variationer, etc. En annan mycket vanlig parameter är naturlig gammastrålning, vilket är en parameter som varierar mellan olika geologiska material och där lerhalten avspeglas tydligt i gammastrålningen. Några parametrar kan man mäta på ett meningsfullt sätt i borrhål med foderrör av plast, medan de flesta parametrarna inte ger något om det finns foderrör av metall, medan andra kräver öppet borrhål.

Oftast mäter man diametern på borrhålet m.h.a. caliper-prob, dels för att det ger värdefull information om formationens egenskaper om det är öppna borrhål, samt att det ger en möjlighet att kontrollera och verifiera foderrörsinstallationen. Diametern behövs också för att korrigera mätdata för vissa parametrar. Video-loggning ger ytterligare möjligheter att inspektera och verifiera installationer i borrhålet.

Med hjälp av optisk eller akustisk televiewer kan man avbilda borrhålsväggen i 360° och bygga upp syntetisk borrhålskärna, vilket kan vara ett billigare alternativ till riktig kärnborrning. Det finns olika typer av flödesloggar som mäter vattenflödet med eller utan pumpning, vilket gör att man kan detektera zoner för in- och utflöden av vatten i ett borrhål, och kvantifiera flödet. I en del fall använder man manschetter för att skärma av delar av borrhålet under flödestest.

Vidare finns det radioaktiva prober, där gamma- gamma- och neutron-loggning bygger på att en sond med en radioaktiv källa och mottagare sänks ner i marken genom ett borrhål. Andelen till sonden reflekterad gamma-strålning står i proportion till densiteten och i viss mån också till porositeten i marken. Antalet till sonden återkomna neutroner speglar vattenkvoten i marken. Dessa parametrar kan mätas genom foderrör, men då foderrör dämpar signalerna krävs kalibrering för en kvantitativ tolkning (Paillet & Ellefsen 2005).

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 noggrannhet oberoende av djup är den värdefull för kalibrering av de ytgeofysiska metoderna. De radioaktiva metoderna är ej lämpliga för kontinuerlig övervakning.

3.8.2 Analys av läckagevatten och turbiditetsmätning

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.

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

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.

3.8.3 Bedömning av övriga metoder

Geofysisk borrhålsloggning kan vara ett värdefullt komplement till ytgeofysik då de ger samma höga upplösning oavsett djup. Som namnet anger är det dock nödvändigt att ha borrhål för att använda metoden.

Turbiditetsmätning och kemisk analys av läckvatten är metoder som ligger utanför de geofysiska. Turbiditetsmätning är lämplig för övervakning och används i mätöverfall.

Kemisk analys av läckvatten används t.ex. vid incidenter/flödesökningar för att analysera läckvattnets härkomst eller vid undersökningar med spårämnesförsök eller liknande.

4 Metodernas användning inom dammsäkerhet

I detta kapitel beskrivs användning av geofysiska metoder utgående från problemfrågeställningen. Det kan handla om generell dammövervakning, specifik övervakning av bestämda felmoder eller geofysiska undersökningar. Tillämpbarheten diskuteras hos olika metoder. Dessutom beskrivs några fullskaleförsök som genomförts och där geofysiska metoder har utvärderats.

4.1 INTRODUKTION

De mätmetoder som tas upp i denna rapport har använts i olika omfattning på dammar. De flesta av dem är relativt obeprövade. Som framgår av genomgången har flera av dem potential att vara användbara för dammsäkerhetsarbete.

Bedömningen av metoderna baserat på praktiska erfarenheter är såklart svårt när erfarenheterna är ringa. Ett annat bekymmer med att bedöma erfarenheten av metoderna har varit att det finns en skevhet i urvalet när metoderna använts. Ofta har metoderna använts när man har speciellt utmanande problem som inte kan lösas med konventionella mätmetoder. I de fall konventionella metoder är tillräckliga finns inget behov av att ta till andra metoder med mindre erfarenhet. Användning av geofysik i dessa situationer har en högre risk att leda till negativt utfall.

När en ny metod testas och utvärderas ställs inte sällan högre krav på denna metod jämfört med konventionella metoder.

Bedöms metoderna baserat på vad som rapporterats och publicerats i litteraturen finns en skevhet i urvalet, då information om misslyckade studier ej sprids då det inte alltid anses vara publicerbart eller av intresse från dammägaren/utföraren. En sammanställning av erfarenheter med geofysik på dammar där samtliga resultat (även de mindre lyckade) ingår hade varit intressant och värdefullt som erfarenhetsåterföring.

En annan sak som är viktig för geofysik i allmänhet, men för utvärdering av metoderna i synnerhet, är att komplettera geofysiska mätningar med referensdata. Alla geofysiska mätningar bör kombineras med insamling av data från borrhinar eller andra mätningar för att kunna relatera resultatet till känd information och därigenom möjliggöra god tolkning.

Ett försök att göra rättvisa bedömningar av nya metoder är att testa dessa under kontrollerade former i laboratorieförsök eller i fullskaleförsök i testdamm. Detta har gjorts vid ett antal tillfällen och behandlas i avsnitt 4.5.

4.2 GENERELL ÖVERVAKNING

För generell dammövervakning är det eftersträvaransvärt att mäta relevanta parametrar på ett sätt som täcker in hela dammen hela tiden. Av speciell vikt för övervakningssystem är att kunna detektera förändringar och en fördel är om det kan ske automatiskt via larm- eller varningssystem.

Relevanta parametrar för övervakning av inre erosion i fyllningsdammar är främst relaterade till läckage och/eller materialtransport, jmf avsnitt 2.5.

För att kunna mäta längs hela dammen krävs möjlighet att täcka in en stor jordvolym med mätinstallationer vid markytan eller i borrhål. Flera geofysiska metoder har denna egenskap. En annan möjlighet är att praktiskt kunna installera ett stort antal sensorer, vilket låter sig göras med optisk fiber där mätning kan ske distribuerat längs fibern.

För att mäta kontinuerligt krävs möjlighet till automatisering av mätningen. Inte alla geofysiska metoder har denna möjlighet i praktiken. För att uppnå en effektiv larmfunktion krävs dessutom någon form av automatisering av utvärderingen. Här pågår en teknikutveckling, men i nuläget uppfyller de flesta geofysiska metoder inte kraven för automatisk larmsättning.

I de kommande avsnitten följer några exempel på användning av geofysiska metoder i normalt driftsläge med tillämpning som kontinuerlig övervakning eller återkommande mätningar.

4.2.1 Temperaturmätning i svenska dammar

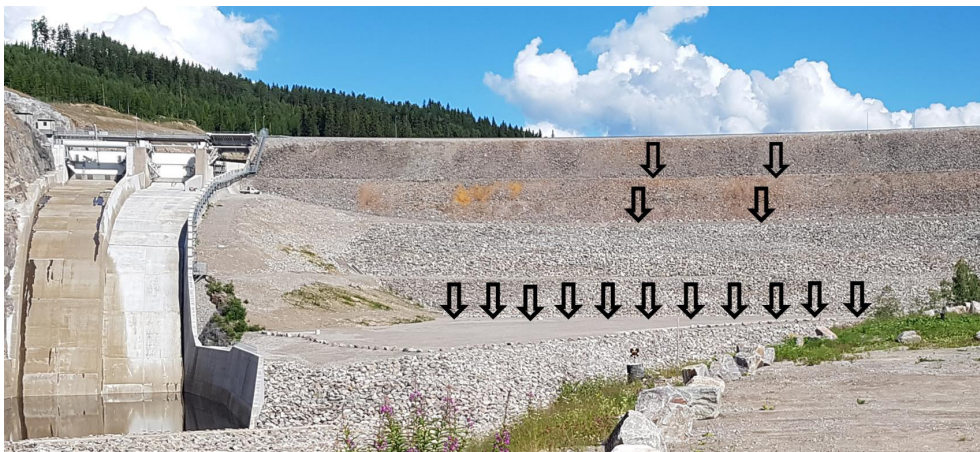
Temperaturmätning tillämpas systematiskt på svenska dammar och är utan tvekan den metod, av de som diskuteras i denna rapport, som har haft störst betydelse i svenskt dammsäkerhetsarbete. Till en början utfördes manuella mätningar med temperaturlod och mätningar med temperaturgivare, främst i vattenståndsrör. Mot slutet av 1990-talet inleddes mätningar med optiska fibrer, en teknik som fick ett stort genomslag och nu är att betrakta som en standard vid nybyggnation.

Fiberoptiska kablar för temperaturmätning fanns år 2016 installerat i 91 svenska dammar (Johansson & Sjödahl 2017). Tekniken har visat sig kunna detektera zoner med avvikande vattenströmning och i flera fall ge en god uppskattning av läckageflödet genom dammen. En anledning till det stora antalet installationer är också att dammsäkerhetshöjande åtgärder utförts på så många svenska dammar under början på 2000-talet. En vanlig åtgärd har varit dammtåförstärkning med omläggning av dränagesystemet och när detta utförts har installation av fiberoptiska kablar blivit utfört. Mätkabeln placeras lämpligen direkt uppströms dränagedledningen. Eftersom mätkabeln kan förläggas längs hela dammen är metoden heltäckande och kan ge detaljerad information om utflödesområden.

Generellt bör kabeln installeras under grundvattenytan i den tänkta strömningsvägen. Omkringliggande material bör utformas så att vattenströmningen påverkas så lite som möjligt.

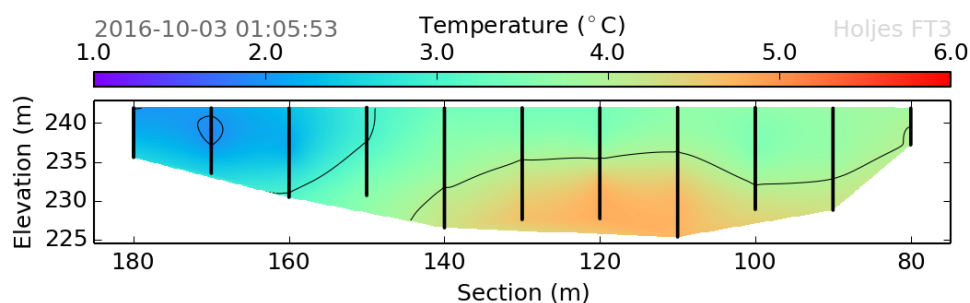
Förutom installation längs dränaget och i nya dammar har fiberoptiska kablar i några fall installerats i diken nedströms dammen eller i vattenståndsrör. Den

senare tekniken kan om vattenståndsrören placeras tillräckligt tätt (ca 10 m) anses vara heltäckande då även ett koncentrerat läckage mellan vattenståndsrören ger upphov till en temperaturförändring, om än mindre, i närliggande rör. Metoden används normalt som komplement till konventionell läckagemätning, men kan även användas då sådan ej är möjlig. Det kan vara då dammen har en nedströms vattenyta eller då det är svårt att samla in dränaget av någon annan anledning, till exempel vid förekomst av mäktiga permeabla jordlager. Ett exempel på en sådan installation visas i Figur 9.



Figur 9 Temperaturmätning med optisk fiber i vattenståndsrör (Johansson & Sjö Dahl 2017).

Elva vattenståndsrör borrade till berg genom permeabla jordlager är placerade längs dammtån med cc omkring 10 m. Temperaturen under grundvattenytan mäts i samtliga rör och interpoleras mellan rören till en temperaturkarta (Figur 10). Det varmare området ligger i gamla älvfåran där huvuddelen av vattenströmningen genom dammen sker. Det kallare området i vänster del är orsakat av grundvattenflöde från anslutningen.



Figur 10 Temperatur vid ett mättillfälle interpolerat mellan elva vattenståndsrör längs dammtån (uppströmsvy) (Johansson & Sjö Dahl 2017).

4.2.2 Resistivitetsövervakning i svenska dammar

Försök med resistivitetsövervakning utfördes tidigt på svenska dammar och de installationer som gjorts och de mätdataserier som samlats in är unika i ett internationellt perspektiv.

Efter inledande försök under kortare tid gjordes den första permanenta installationen av elektroder, samt tillhörande inkoppling av instrument avsett för kontinuerlig långtidsmätning, på en svensk damm 1996 (Johansson & Dahlin 1996). I samband med ett projekt för dammsäkerhetshöjande åtgärder gjordes sedan en ominstallation 2005. Därefter har liknande installationer utförts på ytterligare tre dammar 1999, 2007 och 2007.

I samtliga dessa anläggningar, utom en som var nybyggnation, har installation utförts i samband med höjning av tåtkärnan. Praktiska mätningar och modellering har visat att installation av elektroder direkt i tåtkärnans krön var mest lovande på befintliga dammar (Sjödahl et al. 2006). Kontaktmotståndet blir mindre i tätjord samtidigt som strömmen kanaliseras i tåtkärnan som är den del av dammen med störst övervakningsintresse.

Installation av elektroder längs dammens krön (eller i dessa fall tåtkärnans krön) möjliggör i princip heltäckande mätning. En stor fördel med metoden är att den ger information längs hela dammen och även på olika nivåer. Några karakteristiska egenskaper är dock att metoden har dålig upplösning nära elektrodotläggets ändpunkt, dvs. i anslutningarna om elektroder installeras längs krönet. Upplösningen minskar också med djupet, vilket bör beaktas framför allt på höga dammar då mindre avvikelser på större djup kan vara svåra att detektera.

Kontinuerlig mätning innebär i detta fall att mätning sker varje dygn. För att få fram en modell över resistivitetsfördelningen i dammen krävs efterprocessering av data, s.k. inversion. Detta kan göras automatiskt, men i de anläggningar där metoden används sker idag ingen helautomatisk inversion. Istället samlas data in för att med jämna mellanrum (normalt 1-3 år beroende på behov) analyseras och tolkas.

Vid nybyggnation kan elektroder med fördel installeras inne i dammkroppen. I en av dammarna valdes att installera ett elektrodotlägg längs tåtkärnans krön samt på grundläggningsnivån både uppströms och nedströms om tåtkärnan. Detta förbättrar avsevärt upplösningen på större djup.

Några exempel från dessa mätningar finns redovisade i *Bilaga C* tillsammans med mer ingående beskrivning av metoden.

4.3 ÖVERVAKNING AV SPECIFIKA FELMODER

Övervakning kan vara inriktad med syfte att detektera ett specifikt felförlopp. Vanliga felmoder som normalt aldrig helt kan uteslutas vid en felmodsanalys är inre erosion i damm och i undergrund. Dessa blir naturligt ganska generella till sin karaktär om det inte finns tilläggsinformation om försvagade områden, permeabla lager, sprickzoner, etc. Vanliga, men mer specifika felmoder kan vara:

- *Inre erosion i anslutningar mot betongkonstruktioner.* Läckage i anslutningar mot betongdammar har varit av speciellt intresse i såväl i svenska dammar som utomlands. Vanligt förekommande är sponter i anslutningen, vilket kan medföra sämre packning. Geofysiska mätningar kan vara aktuella för att bedöma dessa typer av problem, men utmaningar saknas inte varför det kan vara klokt att vara selektiv i val av metod. Normalt utgör anslutningarna en mycket komplicerad geometri som komplicerar tolkningen. Många typer av störningar förekommer. Exempelvis utgör förekomst av en metallspont en begränsning för elektriska och elektromagnetiska metoder. Temperaturmätning är dock oftast lämplig. Sådan mätning kan göras i filterzoner eller i dammens nedströmsdel. I specialfall har temperaturmätning utförts i borrhål i betongdammen.
- *Sättningar, utglidningar och rörelser.* Förekomst av rörelser som är synliga på dammens överyta har en underliggande orsak som skapar ett undersökningsbehov. Geofysiska metoder kan då användas som undersökningsmetod eller i vissa fall senare som övervakningsmetod.
- *Övervakning av injekteringsridå* är ofta relevant för att försäkra sig om att reducera upptryck på betongkonstruktioner eller läckage i berg. Normalt utförs detta med tryckmätning.
- *Övervakning av jordinjektering.* Jordinjektering används vid grundläggning på permeabla jordar och här kan det finnas ett stort övervakningsbehov för åldrande dammar. Geofysiska metoder kan vara aktuella. Eftersom det normalt rör sig om relativt stora djup kan borrhålsmetoder eller temperaturmätning i borrhål komma ifråga.
- *Läckage i övergång mellan jord- och berggrundläggning* kan utgöra en svag zon, men för val av metod är det ingen större skillnad mot övrig mätning i grundläggningen.
- *Genomföringar.* Genomföringar i dammar bör undvikas och är ovanliga, men när de förekommer utgör de alltid en risk och är en potentiell felmod.

Dessa felmoder är bara ett urval och liksom att varje dam är unik har den ofta sina unika felmoder. Ett exempel på en speciell felmod som utretts omfattande med geofysiska mätningar beskrivs i nästa avsnitt.

4.3.1 Undersökning och övervakning av sjunkhål (WAC Bennett Dam)

När inre erosion får fortgå under lång tid kommer förloppet i något skede sannolikt att ge sig till känna på dammens överyta i form av utflödespunkter eller sjunkhål. Skulle det inträffa uppkommer normalt ett undersökningsbehov för att ta reda på orsaken och bättre förstå bakomliggande processer. Baserat på dessa undersökningar kan svagheter i dammens konstruktion konstateras. I vissa fall utförs reparationsåtgärder och begränsning i anläggningens driftsförhållanden kan bli aktuellt. Efter genomförda undersökningar uppkommer i driftskedet därefter ett speciellt övervakningsbehov för att säkerställa att liknande processer upptäcks i ett tidigt skede för att säkerställa att liknande incidenter ej uppkommer igen.

Efter en incident finns det alltså initialt ett undersökningsbehov och i ett senare skede oftast ett ökat övervakningsbehov av tidigare skador, reparerade områden och liknande problemområden. Ett exempel som är relativt välkänt i Sverige är ett

sjunkhål som uppkom på WAC Bennett Dam 1996. I de studier och utredningar som initierades efter det att sjunkhålet upptäckts involverades svensk personal och ett långt svenskt-kanadensiskt samarbete inom dammsäkerhet påbörjades.

I undersökningsskedet användes geofysiska metoder vid WAC Bennett Dam. Totalt använde man sig av 14 olika metoder/tekniker och den kampanj med geofysiska mätningar som genomfördes där har beskrivits som en av de största någonsin utförda på en fyllningsdamm (Gaffran & Watts 2000).

En teknik som användes var att mäta med olika geofysiska metoder i närheten av det uppkomna sjunkhålet för att kunna identifiera signaturer för respektive metod. Liknande signaturer söktes sedan i övriga delar av dammen för att om möjligt identifiera andra områden längs dammen med samma typ av skada. Metoderna som användes var:

- SP-mätning (landbaserat och i magasinet).
- Resistivitetsmätning (olika uppställningar/konfigurationer).
- Elektromagnetiska mätningar (EM34, EM61 och georadar).
- Magnetometri.
- Borrhålsmetoder (vertikal seismisk profilering, seismisk tomografi, radartomografi, radioaktiva metoder).
- Temperaturmätningar.

Gaffran & Watts (2000) sammanfattar resultaten som till viss del framgångsrika. De geofysiska undersökningarna gav ingen kvantitativ bedömning över dammens tillstånd och inte heller någon förklaring till sjunkhålen. Vissa av metoderna gav en signatur i området runt sjunkhålet som inte återfanns på övriga dammen vilket gav en indikation på att inga liknande skador fanns i övriga delar.

Flera geofysiska metoder har använts igen efter de inledande undersökningarna. Utförs dessa undersökningar på samma sätt under liknande yttre förhållanden (magasinsnivå, årstid, etc.) kan de användas för att studera eventuella förändringar. I Bennett dam användes framför allt seismisk tomografi i form av upprepade seismiska mätningar mellan två borrhål (Garner & Vazinkhoo 2007). Den slutliga förklaringsmodellen till sjunkhålens uppkomst var sämre packning nära en installerad "instrumentation well" (vilken användes för inmätning vid byggnationen) och upphängning av tät kärnan runt denna vilket ledde till lokala sättningar som fortplantade sig uppåt. Därför upprättades övervakning inte bara vid sjunkhålet utan även vid övriga platser med "instrumentation wells". Mätningen utfördes mellan två borrhål på vardera sidan om det övervakade området. I något fall utfördes även mätningar mellan dammens uppströms och nedströmssida istället för att använda borrhål. Avståndet mellan sändare och mottagare var känt vilket gjorde att hastigheten hos den seismiska vågen kunde beräknas för olika nivåer. (Metoden beskrivs i *Bilaga H* samt i Figur H 1 och Figur H 2) Tanken var att sjunkhål eller områden med sämre packning/högre porositet skulle få en lägre hastighet. Genom att utföra årliga mätningar kunde eventuella förändringar över tid studeras.

På senare tid har flera av de undersökningshål och inklinometerrör som utnyttjades under perioden efter upptäckten av sjunkhålet gjutits igen. I dessa har man förberett med installation av optiska fibrer för att möjliggöra aktiv och passiv

temperaturmätning samt seismisk mätning där fibern används som mottagare (en serie geofoner).

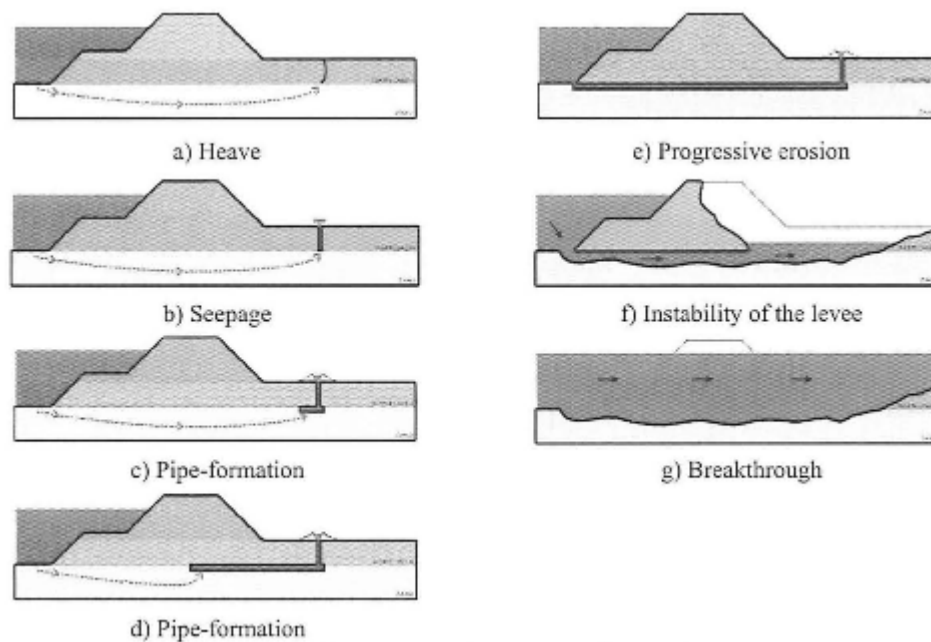
4.3.2 Inre erosion i undergrund (invallningar)

Invallningar är dammar som i normalfallet inte utsätts för full vattenlast eller ingen vattenlast alls, men som i en höglödessituation fungerar som en damm. Mätning och övervakning av invallningar är ett omfattande område internationellt, men är inte lika vanligt förekommande i Sverige. Eftersom invallningarna inte utsätts för vattenlast en stor del av tiden kan det vara svårt att kontinuerligt bedöma deras funktion. Invallningar är ofta långa och relativt låga, vilket är gynnsamt för geofysiska metoder som kan täcka in hela strukturen vid mätning.

I ett pågående projekt längs floden Po i Italien utförs resistivitetsövervakning längs invallningar till bevattningskanaler. Tanken är att ett permanent mätsystem kan övervaka strukturens vattenmättnadsgrad och därigenom identifiera kritiska områden och i förlängningen detektera kritiska förhållanden. Inledande försök indikerar att resistiviteten följer de vattenmättnadscykler som uppkommer till följd av säsongsvariationer i nivån i kanalen (Arosio et al. 2017).

Installationer av optiska fibrer för läckagedetektering genom temperaturmätning har utförts längs invallningar bl.a. i Rhone Frankrike och Rhen i Tyskland.

I Nederländerna finns en lång tradition av att arbeta med dammsäkerhet för dammar/invallningar, ofta homogena uppbyggda av täta jordar, grundlagda på permeabla sandiga jordar. En relevant felmod, bakåtskridande erosion i undergrunden, kan beskrivas som i Figur 11.



Figur 11 Exempel på brottförlopp baserat på bakåtskridande erosion i undergrunden (van Beek et al. 2010).

Eftersom själva brottsförloppet kan gå ganska fort är övervakning viktig. Ett annat krav på övervakningen är att den kan täcka in långa dammsträckor till en rimlig insats. Livedijk (2018) är ett pågående projekt med mätning/övervakning på invallningar.

4.4 ANDRA TILLÄMPNINGAR

Övervakning av läckage och inre erosion i fyllningsdammar och dess grundläggning har varit huvudinriktning för tillämpning av geofysiska mätningar. Det finns dock ett flertal andra tillämpningar där geofysiska mätningar kan vara intressant och bidra i dammsäkerhetsarbetet. Några av dessa är:

- *Grundundersökningar inför nybyggnation av dammar.* Inom detta område har geofysiska undersökningar använts frekvent under lång tid och det finns väl dokumenterat. Vanligt är att beskriva undergrundens beskaffenhet. Mer specifikt kan det röra sig om t.ex. bestämning av bergytans läge eller jordlagerföljder (seismik, georadar, resistivitet), lokalisering av svaghetszoner i berg (seismik, georadar), lokalisering av vittrat berg med leromvandlade eller vattenförande zoner (resistivitet, elektromagnetiska metoder).
- *Bestämning av tät kärnans krönnivå.* Detta är en högst relevant frågeställning relaterat till bedömning av dammens förmåga till tillfällig överdämning. Det finns flera orsaker till att det kan råda osäkerhet om nivån för tät kärnans överkant, t.ex. bristfällig dokumentation, sättningar och återfyllningar, etc. Ofta görs kontroller av tät kärnans överkant med provgroppsgrävning. Georadar är ett utmärkt komplement som lämpligen kombineras med provgropar för att ytterligare öka säkerheten i nivåbestämningen.
- *Undersökning av sponter status och funktion.* Träsponter förekommer som del av den tätande funktionen i många dammar. Ofta är dessa dammar äldre konstruktioner och träspontens status är en osäkerhet. Nedbrytning av träsponten och ökat läckage är en möjlig felmod. I förlängningen kan det leda till tryckökningar i nedströmsdelen av dammen. Dammar med träspont är ofta relativt låga vilket är gynnsamt för flera geofysiska metoder. Här finns möjligheter att tillämpa geofysik.
- *Undersökning på grund av bristande dokumentation.* I äldre, ofta lägre, dammar är det inte ovanligt med bristfällig dokumentation. Ibland saknas helt uppgifter om dammens konstruktion. Då kan det finnas ett undersökningsbehov där geofysiska metoder kan vara användbara.
- *Undersökning och/eller övervakning av skredområden.* Geofysiska metoder, främst elektriska, har använts frekvent för att bedöma skredrisker och övervaka slänter där skredrisk föreligger. Skred kan utgöra en dammsäkerhetsrisk. Problemet är inte så relevant för svenska förhållanden, men det finns mycket internationell erfarenhet.
- *Undersökning av frostpåverkan.* Svenska klimatförhållanden innebär nedkylning vintertid med frostpåverkan. Det kan leda till skador på framför allt dammens tät kärna, varför det finns motiv till temperaturmätning av frostnedträngning. I stenfyllningsdammar kan konvektion i stödfyllningen ge frusna partier långt in i dammen, vilket kan leda till skador på filter och dränage.

4.5 FULLSKALETESTER PÅ DAMMAR

Fullskaletester har fördelen att metoder kan tillämpas och utvärderas i en kontrollerad miljö. Ett antal tester har utförts och lärdomar har dragits om flera av de mätmetoder som diskuteras i denna rapport. Utvalda resultat från några internationella tester redovisas här. Även i Sverige har liknande idéer förts fram. Under 2018 påbörjades planering för fullskaletester i Älvkarleby där inledande simuleringar utförts och möjlighet kommer att finnas att testa olika mätmetoder i praktiken.

4.5.1 Ijkdijk, Nederländerna

Ijkdijk är ett nederländskt forskningsprojekt för fullskaliga tester av dammar och invallningar. Syftet med satsningen har varit främst att öka förståelsen för invallningars funktion och brottsförlopp samt att utveckla och testa mätmetoder för att ge tidig varning vid dammbrottsituationer.

Ett antal dammbrottsförsök har sedan 2007 genomförts, och rapporterats bl.a. av Koelewijn & Peters (2012) och Koelewijn et al. (2014), vid testplatsen nära Booneschans i nordöstra delen av landet (Figur 12). Dammarnas storlek har varierat något men är ca 3-5 m höga och upp till 50 m långa. Samtidigt pågår ett parallellt projekt, Livedijk, med utökade mätningar på verkliga invallningar (Livedijk 2018).

Erfarenhetsmässigt är vattenströmning i undergrunden ett av de största dammsäkerhetsproblemen vid nederländska invallningar (VНК1, 2005), och flera av testdammarna har varit inriktade mot att ta reda på mer om felmoder som är relaterade till läckage i grundläggningen. I flera försök har en tät homogen damm grundlagts på sand eller skiktade lösa jordar. Under 2009 utfördes fyra försök på 3,5 m höga dammar grundlagda på sand där brottsmekanismen var bakåtskridande erosion (piping) i undergrunden. Vid dessa försök utfördes förutom ett tätt nät av porttrycksmätningar bland annat mätningar av rörelser och temperatur med optisk fiber, temperatur med traditionella sensorer och infraröd kamera, akustisk samt SP.



Figur 12 Testplatsen IJkdijk för fullskaleförsök på dammar och invallningar (Koelewijn & Peters 2012).

Erfarenheter från temperaturmätningarna har rapporterats av de Vries et al. (2010) och Bersan et al. (2015). Mätningar med optisk fiber utfördes dels med den aktiva metoden och dels utan uppvärmning. Fibern placerades längs dammen på sex olika platser och mätningarna detekterade ett antal områden med avvikande temperatur där dessutom förändringen över tid kunde följas. Mätningar gjordes även utan artificiell uppvärmning. Då användes en geotextil med inbyggda fiber (Artières et al. 2010).

Med temperaturmätningar kunde olika områden identifieras och utveckling över tid följas på ett sätt som överensstämde väl med porttrycksmätningar och andra observationer.

4.5.2 Røssvatn, Norge

Med start 2001 utfördes en serie genomströmnings- och stabilitetstester på ett flertal 5-6 m höga och ca 40 m långa dammar i norska Røssvatn. Dammarna uppbyggda av olika material testades för överströmning och brottsförloppen studerades (Høeg et al. 2004).

Vid ett av dessa försök, testdamm 2003-1, anordnades en test av olika mätmetoder som ett sidoprojekt. Försöket utfördes som en blindtest där ett antal defekter byggdes in i dammen, och där defekternas utformning och läge var okända för de

som utförde mätningarna. Målet var att detektera dem så bra som möjligt och sedan utvärdera metoderna. Försöket har beskrivits i sin helhet av Johansson & Nilsson (2005a).

De mätmetoder som testades var temperatur, SP och resistivitet. Projektet lades upp som en förstudie, och därefter fältmätningar och utvärdering. Projektorganisationen delades upp i en designgrupp och en mätgrupp. I förstudien utförde mätgruppen modelleringar av olika typer av skador och resultaten överlämnades till designgruppen. Designgruppen bestämde defekternas utformning och läge. Mätgruppen utförde sedan mätningar under ca en vecka.

Temperatursensorer (PT100) placerades längs dammtån med ca 1,5 m mellanrum (Figur 13). Sensorerna fördes in ca 5 cm i gruset mellan de större stenarna. Mätdata registrerades var femte minut. Även temperaturen i magasinet registrerades. Temperaturavvikelser i tid och rum noterades. Resultaten visade tydliga avvikande värden för samtliga defekter och eftersom försöken pågick under höjning av magasinsnivån kunde även vissa slutsatser dras om skadornas nivå trots att sensorerna bara var installerade på en nivå i dammens nedströmsdel.



Figur 13 Testdammen i Røssvatn med icke-polariserbara SP-elektroder och resistivitetselektroder längs krönet samt temperaturmätning med sensorer längs nedströms tå.

Resistivetsmätning utfördes som tvådimensionell mätning, så kallad CVES (Continuous Vertical Electrical Sounding), med ett elektrodutlägg längs krönet där totalt 63 elektroder placerades med 2/3 m mellanrum (Figur 13). Ett antal mätningar genomfördes med olika mätkonfigurationer och vid olika magasinsnivåer. Områden med avvikande resistivitet noterades. Vidare utnyttjades de transienta förloppen genom att jämföra mätningar vid olika

magasinsnivåer. Erfarenheterna kring resistivitetsmätningen beskrivs mer detaljerat av Sjödahl et al. (2010).

SP-mätningen utfördes dels med elektroder installerade längs dammkrön (Figur 13) och dels med mobila elektroder som flyttades runt likt en normal SP-undersökning. Längs krönet fanns 49 icke-polariserbara Cu-CuSO₄ elektroder med avstånd 0,8 m. Även här utfördes och analyserades mätning vid olika magasinsnivåer. Vid utvärderingen förmodades områden med inläckage ha negativ laddning och områden med utläckage positiv laddning. Speciellt söktes avvikande områden med stor variation i SP-data.

Tre defekter hade byggts in i dammen, men utöver dessa noterades ett oavsiktligt läckage i tätningen runt de dränageledningar som förlagts i dammens grundläggning för att kunna reglera magasinet. Sammanlagt var det alltså fyra defekter. Det fanns även fler aspekter kring dammens design som var försvårande för mätmetoderna i praktisk mätning och komplicerade utvärderingen i förhållande till vad som antagits i förstudien.

Sammantaget visade resultaten att temperaturmätning var en effektiv metod som upptäckte samtliga fyra skador. Resistivitetsmätningen detekterade en skada baserat på engångsmätning och ytterligare två baserat på upprepade mätningar med varierande magasinsnivå. SP-mätningarna detekterade en av skadorna baserat på upprepade mätningar.

De goda resultaten för temperaturmätningarna uppmuntrade till temperaturövervakning i dammtån och gav därmed stöd till metodiken att installera optisk fiber i dammtån i samband anläggande av stödbankar i de dammsäkerhetshöjande projekt som började bli vanliga vid den tiden.

En lärdom för resistivitetsmätningen var vikten av att kunna utföra upprepade mätningar, vilket på ett avgörande sätt förbättrar möjligheten att se avvikelser. Även möjligheten att höja och sänka magasinet och därigenom mäta vid olika magasinsnivåer var gynnsam. Andra faktorer som var fördelaktiga var den begränsade dammhöjden, den goda elektrodkontakten i dammens tätjord, och det relativt korta elektrodavståndet.

För SP-mätningarna drogs slutsatsen att de avvikelser som uppkom var mycket små och metoden var därför störningskänslig. Låg konduktivitet i vattnet bidrog till svag signal. Därutöver identifierades ett antal störkällor på plats.

4.5.3 Andra exempel på fullskaleförsök

I Karlsruhe i Tyskland utfördes försök på en fullskalig testdamm med start 1984 (Armbruster et al. 1989). Dammen var 3,6 m hög och 22,5 m lång. Dammen instrumenterades med temperatursensorer och SP-elektroder samt infraröd kamera förutom givare för tryckmätning och läckagemätning. Mätningarna pågick under lång tid. Dammen var uppbyggd av sand och försök gjordes med och utan ett tätskikt i uppströmsslänten samt med skador i tätningen. För temperaturen konstaterades en stor påverkan från vattenströmning, men dammens homogena struktur försvårade lokalisering av läckaget med valda installationer. SP-mätningen reagerade direkt på förändringar i vattenströmning men tolkningen var

inte entydig. Sammantaget bedömdes resultaten visa att temperaturmätning, och SP-mätning till viss del, är användbara för detektion av läckage i dammar.

I ett pågående projekt i Czernichow utanför Krakow i Polen har en invallning byggts med syfte att utveckla en mätinfrastruktur för översvämningsskydd som kan hantera dynamiska processer i invallningar. Dammen, som är 4,5 m hög och 208 m lång, är utrustad med temperatursensorer och optisk fiber för temperaturmätning (Sekula et al. 2017). Fiberkabeln har även en kopparslinga för uppvärmning vilket möjliggör analys med den aktiva metoden. Metoderna har valts för att de bedömts ha goda möjligheter att detektera vattenströmning och inre erosion samt stabilitetsproblem, men ingen utvärdering av mätmetoderna har påträffats än.

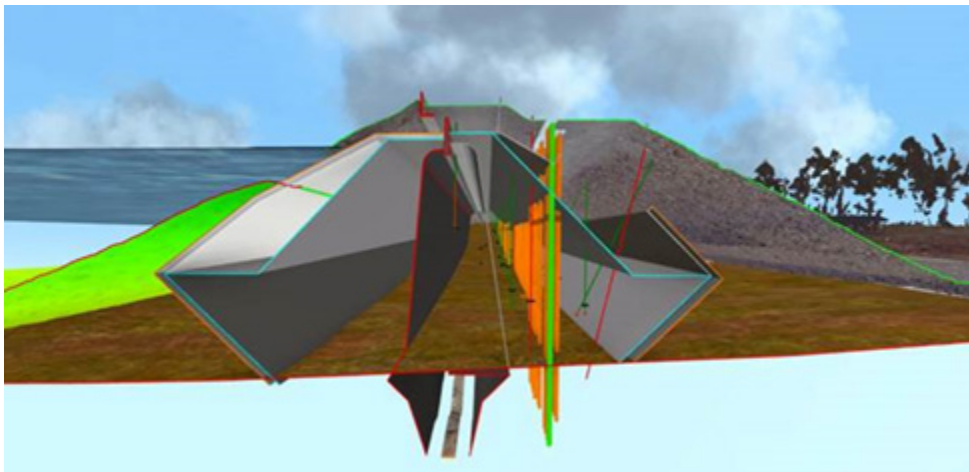
5 Diskussion

5.1 PÅGÅENDE TEKNIKUTVECKLING - ALLMÄNT

Som framgått vid genomgången av de olika teknikerna så är det inte många helt nya som har tillkommit under de senaste decennierna. Mycket har dock skett beträffande datainsamling, mätnoggrannhet, dataprocessering och utvärdering. Detta, tillsammans med de erfarenheter som erhållits vid användning av metoderna har bidragit till en större förståelse för hur metoderna bäst kan användas, liksom i vilka situationer där de är mindre lämpliga att använda.

Eftersom metoderna även används inom andra teknikområden kan den teknikutveckling som sker där tas till vara för tillämpning på övervakning av dammar. Den största tillämpningen av geofysiska mätningar är fortfarande inom oljeindustrin, men tillämpningarna inom infrastruktursektorn har också ökat genom att detaljeringsgraden ökat genom bättre mät- och utvärderingsteknik.

Intressant är att notera att kombination av metoder är vanligt förekommande, speciellt inom oljeindustrin. Gemensam presentation av data förekommer ofta. Detta underlättas tack vare de visualiseringshjälpmedel som tagits fram de senaste åren. Dessa medför utmärkta möjligheter att samtidigt kunna visa mätvärden, dessas läge, samt hur konstruktionen ser ut (Figur 14). Olika grupper arbetar parallellt med att utveckla bättre verktyg för att visualisera geofysiska modeller tillsammans med data från geotekniska sonderingar, borrhningar, analyser från provtagningar, byggnadselement, etc., där GeoBIM är ett exempel (Svensson & Friberg 2017).



Figur 14 Exempel på redovisning av mätdata i en 3D-modell (tillhandahållen av Uniper/WSP).

Betydande utveckling har också skett inom fjärranalys (Remote Sensing), som i vissa fall baseras på geofysiska metoder. Från att ha varit främst satellitbaserad har tekniken utvecklats för att även kunna användas mer småskaligt med drönare eller fasta installationer. Detta har medfört att några metoder fått en vidare tillämpning. Bland dessa kan nämnas analys av synligt ljusspektrum (för bildbearbetning etc.), samt multi-spektral analys (bearbetning av synligt ljus, IR, UV, elektromagnetisk/

radiovågor). Dessa metoders användning för övervakning av dammar ger potentiell möjlighet att se vattenhaltsförändringar/fuktinnehåll, utströmningsområden, sjunkgropar, rörelser etc. Metoderna har använts i några fall.

Vid utvärdering av data pågår arbete med att utnyttja artificiell intelligens, maskininlärning, samt neurala nätverk. Detta sker inom flera teknikområden och även inom vårt område borde tillämpningar komma fram. Tekniken är främst användbar vid stora datamängder av bra kvalitet. Dessvärre är detta ofta inte fallet vid geofysiska mätningar, där mät- eller utvärderingsnoggrannheten ofta inte blir så hög som man skulle önska, vilket försvårar tillämpningen av dessa metodiker.

Möjligheterna att simulera de bakomliggande fysikaliska processerna har ökat och kommer att ytterligare förbättras i framtiden. Även här kan vi tillgodogöra oss den utveckling som pågår för andra tillämpningar.

5.2 INTERNATIONELLA RIKTLINJER/ERFARENHETER FÖR ANVÄNDNING AV GEOFYSISKA METODER PÅ DAMMAR

Allmän presentation av olika geofysiska metoder för mätning på dammar förekommer i flera internationella sammanhang, exempelvis ICOLD Bulletin 158 och 180 (ICOLD in press), FEMA (2015) samt ICOLD (2015). Några riktlinjer eller rekommendationer har dock inte tagits fram av någon internationell eller nationell organisation.

För ca 15 år sedan genomfördes ett flertal geofysikprojekt inom Dam Safety Interest Group, DSIG (en samarbetsorganisation underställd CEATI med representanter från dammägare i Kanada, Sverige, USA, Frankrike, m.fl.). De manualer som togs fram där beträffande mätning av resistivitet (Dahlin et al. 2008), självpotential (Corwin 2005) och temperatur (Johansson & Sjødahl 2009) är fortfarande unika och kan utgöra vägledning hur dessa metoder kan användas. Dessa är dock i behov av uppdatering för att ge en bättre bild av dagens möjligheter.

Erfarenheter från användning av flera geofysiska metoder på en enskild damm är tämligen begränsade, men enstaka exempel finns. Eftersom undersökningarna gjorts på en specifik damm, blir det ofta problem att överföra resultatet till en annan damm om förhållanden avviker mycket. De omfattande geofysiska undersökningarna som användes vid WAC Bennett dam i Kanada finns utförligt redovisade i flera rapporter (se avsnitt 4.3.1). Denna damm är dock avsevärt högre än vad vi har i Sverige.

Några exempel där geofysiska metoder använts för undersökning eller mätning av dammar finns att läsa i FEMA (2015) eller i ICOLD Bulletin 180 (in press). Den senare rapporten beskriver generellt mätningars betydelse för förebyggande/upptäckt av incidenter/ problem. Av de ca 80 exempel som redovisas finns några där geofysiska metoder använts:

- Ambiesta dam – cracks detection using sonic tomography (*borrhålsseismik*).
- Heterogeneity of an embankment core, (*temperatur*).
- Pecineagu dam – Concrete Face Rockfill Dam (*georadar*).
- Ohrigstad dam geophysical investigations with a twist (*SP, slagruta*).

Dessa exempel, tillsammans med de erfarenheter som erhållits vid de större fältförsök som beskrivits ovan (Rössvatn, Ijkdijk, m.fl.), kan tillsammans ge värdefull vägledning vid val av geofysiska undersökningar för en specifik damm.

5.3 FRAMTIDA MÖJLIGHETER

Förståelsen för de grundprinciper som de geofysiska metoderna baseras på är dessvärre ofta inte tillräcklig. Mätning på dammar innebär också nya utmaningar även för geofysiker som inte arbetat med metoderna på dammar. Metoderna har därför använts med "blandad framgång". För att metoderna ska kunna bli framgångsrika och användbara fordras att förståelsen ökar både bland dammägare och geofysiker. Detta skulle kunna göras genom endagskurser med detta tema.

Tolkning av mätresultat kräver generellt en grundläggande förståelse av det som uppmätts. Detta är många gånger svårt även vid tolkning av en så vanlig parameter som tryck, vilket ofta visar sig kunna tolkas på flera sätt. Eftersom geofysiska mätningar är av indirekt natur (jfr exempelvis sambanden som visas i kap 2) blir tolkningen ännu svårare. Att då kunna få tolkningsstöd baserat på simuleringar är därför angeläget, och kanske en nödvändighet för att kunna utnyttja de geofysiska metodernas fulla potential.

Framställningen i denna rapport är främst inriktad på mätning i befintliga dammar, vilket medför att mätmöjligheterna begränsas av dammens utformning. Vid nybyggnation eller vid ombyggnad finns möjlighet att installera den mätutrustning som krävs på ett bättre sätt, där störningar kan minimeras. Därigenom kan ett bättre resultat fås där geofysiska metoder avses användas för övervakning av dammar, då utvärdering kan baseras på analys av relativa förändringar. Här har Sverige varit ett föregångsland främst beträffande installation av optiska fibrer för temperaturmätning samt fasta installationer för resistivitet, IP- och SP-mätningar.

Utvärdering och analys av geofysiska mätdata är ofta komplicerad och tidskrävande. För att metoderna ska kunna användas vid övervakning krävs därför att utvärderingen kan automatiseras i högre grad. Detta sker idag inom exempelvis akustiska mätningar vid läckageövervakning av pipelines eller gasläckage från CO₂-lagring, samt för läckageövervakning baserat på temperaturmätning. Det senare finns på ca 10 dammar i Sverige sedan över tio år. Dessa exempel visar att geofysiska metoder kan användas och integreras med övrig mätning. Ett ytterligare steg skulle vara att inkludera fler parametrar vid analysen, och basera detta på generella beräkningsmodeller för dammen.

6 Slutsatser och rekommendationer

Övervakning och instrumentering av dammar har under 2000-talet tilldelats stora resurser och lett till flera framsteg. Speciellt viktigt har det varit på svenska dammar, då det svenska dammbeståndet är relativt gammalt och mätning och övervakning tidigare varit underprioriterat. Utvecklingen har lett till ett mera systematiskt dammsäkerhetsarbete med både generell övervakning och inriktning mot specifik övervakning av analyserade felmoder.

I den ökade satsningen på instrumentering och övervakning har dock flera geofysiska metoder inte används i någon större utsträckning. Att så är fallet beror på att metodernas känslighet är för liten eller att mätning/utvärdering är för komplicerat/kostsamt. Den tekniska utvecklingen har dock varit snabb och har gjort att flera metoder kan bli aktuella att bidra till dammsäkerhetsarbetet, såväl för övervakning som undersökning. De litteratursökningar som gjorts visar också att geofysiska mätningar internationellt har använts frekvent inom dammsäkerhetsområdet.

Av de metoder som diskuteras i rapporten är tveklöst temperaturmätning den som används mest. Goda grundförutsättningar, tidiga satsningar med lovande resultat samt teknisk utveckling för distribuerad temperaturmätning med optisk fiber har varit orsaken.

Snabb teknisk utveckling har lett till stora framsteg för akustiska metoder, främst refraktionsseismik och ytvågsseismik. Dessa metoder kan vara relevanta idag men har hittills haft få tillämpningar i svenska dammar. Även för denna teknik kan kombination med optisk mätning kanske komma att innebära ett tekniksprång. Det behövs dock verifiering av att det ger tillräcklig upplösning samt fortsatt forskning och utveckling för att metoderna ska kunna hantera den speciella geometrin på och inuti fyllningsdammar på ett tillfredsställande sätt.

Elektriska metoder har i tidigare forskningsprojekt utvecklats och anpassats för dammövervakning. Metoderna används vid svenska dammar, men har under senare år inte tillägnat sig den teknikutveckling som skett inom andra teknikområden, och därför finns det främst för resistivitet och inducerad polarisation en outnyttjad utvecklingspotential. Metoderna har utvecklats mycket vad gäller mätteknik och signalbehandling. Vidare har invers numerisk modellering, som är en förutsättning för att tolka data, utvecklats starkt. Det skulle vara tekniskt möjligt att göra 4D inversion, dvs. att analysera för förändring i tiden i modeller som geometriskt beskriver dammen i 3D.

Bland de elektromagnetiska metoderna har georadar historiskt haft störst tillämpning och teknikutvecklingen har även här varit betydande. Metoden har stor potential för undersökning men begränsad potential för övervakning.

Gravimetriska metoder och magnetiska metoder bedöms ha begränsad användbarhet för övervakning men viss potential som undersökningsmetod.

Metoder som kan detektera inre erosion är av speciellt intresse. I händelse av inre erosion påverkas ett antal direkta parametrar såsom läckageflöde, porositet och

finjordshalt. De flesta geofysiska metoder mäter dock andra parametrar (indirekta), vilka i sin tur har en koppling till de direkta. I val av mätmetod och i framtida utvecklingsåtgärder på nya metoder är det fundamentalt att ha klart för sig hur denna koppling ser ut. I vissa fall kan det krävas specialstudier (numeriska beräkningar, modelleringar) för att klarlägga dessa kopplingar.

Denna rapport är huvudsakligen en kunskapssammanställning som kan vara ett avstamp inför en ny satsning på geofysiska metoder i dammsäkerhetsarbetet. Några rekommendationer för fortsatta studier eller för att öka kunskapen kring användande av geofysiska metoder är:

- Fokusera på flödesberoende parametrar, dvs. de metoder vars mätparametrar har direkt koppling till läckageflödet. Övriga metoder kan också fungera, men med högre ställda krav på mätnoggrannhet etc.
- Utbildningssatsning i form av seminarium, temadag eller en mindre kurs inom geofysik kan vara ett inledande steg att höja kunskapsnivån i branschen.
- Erfarenhetsåterföring av geofysiska satsningar i branschen där användande av geofysiska metoder dokumenteras och där även mindre lyckade erfarenheter inkluderas.

Nya forskningssatsningar kan vara aktuellt för några av metoderna:

- Temperaturmätning står till stor del på egna ben eftersom tillämpningen är utbredd i branschen, men även här finns behov för branschutbildning och tolkning av mätdata.
- Inom akustiska mätningar har teknikutveckling gjort att metoden kan gå från undersökning till övervakning. Speciellt intressant är mikroseismik och passiv läckljudsmätning och därtill finns möjlighet till datainsamling i optiska fibrer.
- För elektriska mätningar finns en betydande utvecklingspotential att föra in automatisering som började utvecklas för dammar för ett drygt decennium sedan, men där det saknats resurser på senare tid, och utvecklingen sedan gått längre inom andra tillämpningar. Bättre hantering av dammgeometrier samt elektrodplacering eventuellt med styrd borrhning är också lovande förbättringsområden.
- Integrerad modellering/inversion av flera sammanlänkade parameter simultant, t.ex. flöde, temperatur, resistivitet, IP och SP, skulle kunna öka förståelsen för de interna processerna i en fyllningsdamm. Genom att tolka de olika typerna av data tillsammans med ett verktyg baserat på de fysikaliska processerna bör möjligheterna att göra en bättre samlad tolkning förbättras.

7 Referenser

- Annan A.P. (2005) GPR Methods for Hydrogeological Studies. In: Rubin Y., Hubbard S.S. (eds) *Hydrogeophysics*. Springer, Dordrecht, 185-213.
- Armbruster H., Brauns J., Mazur W. & Merkler G.P. (1989) *Effect of leaks in dams and trials to detect leakages by geophysical means*, In: Lecture Notes in Earth Sciences, vol. 27, eds. Merkler G.P. et al., Detection of subsurface flow phenomena, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg: 3-18.
- Arosio, D., Munda, S., Tresoldi, G., Papini, M., Longoni, L. & Zanzi L. (2017) A customized resistivity system for monitoring saturation and seepage in earthen levees: installation and validation. *Open Geosciences*, 9, 457-467, doi: 10.1515/geo-2017-0035.
- Artières O., Beck Y.L., Fry J.-J., Guidoux C. & Pinettes P. (2010). *Monitoring of Earthdams Leaks and Stability with Fibre-Optics based Monitoring System*, 8th, Procs. ICOLD European Club Symposium, Innsbruck, Austria, 449-454..
- Bastani M. (2001) *EnviroMT – A new Controlled Source/Radio Magnetotelluric System*. PhD thesis, Uppsala University. ISBN 91-554-5051-2.
- Beek, V.M. van, Bruijn, H.T.J. de, Knoeff, J.G., Bezuijen, A. & Forster, U. (2010). *Levee failure due to piping: A full-scale experiment*, Proc. 5th Inti. Conference on Scour and Erosion, San Fransisco (CD-ROM), ASCE, Reston, VA.
- Bersan S., Koelewijn A. & Simonini P. (2015) *Application of distributed temperature sensors in piping-prone dikes*, FMGM 2015 – PM Dight (ed.) 2015 Australian Centre for Geomechanics, Perth, ISBN 978-0-9924810-2-5.
- Bérubé A. P. (2004) *Investigating the Streaming Potential Phenomenon Using Electric Measurements and Numerical Modelling with Special Reference to Seepage Monitoring in Embankment Dams*, Doctoral thesis, Luleå University of Technology, ISBN: LTU-DT–04/59–SE, 98p.
- Bertin B. & Loeb J. (1976) *Experimental and Theoretical Aspects of Induced Polarization, Vol. 1 Presentation and Application of the IP Method Case Histories*, Gebrüder Borntraeger, Berlin , ISBN 3 443 13009 7, 250p.
- Bièvre G., Lacroix P., Oxarango L., Goutaland D., Monnot G. & Fargier Y. (2017) Integration of geotechnical and geophysical techniques for the characterization of a small earth-filled canal dyke and the localization of water leakage, *Journal of Applied Geophysics*, 139, 1–15.
- Binley A. (2015) Tools and Techniques: Electrical Methods, in *Treatise on Geophysics*, 2nd edition, vol. 11, pp. 233-259.
- Bogoslovsky, V.A. & Ogilvy, A.A. (1970) Application of Geophysical Methods for Studying the Technical Status of Earth Dams, *Geophysical Prospecting*, 18, 758-773.
- Boleve A., Vandermeulebrouck J. & Grangeon J. (2012) Dyke leakage localization and hydraulic permeability estimation through self-potential and hydro-acoustic

measurements: Self-potential 'abacus' diagram for hydraulic permeability estimation and uncertainty computation, *Journal of Applied Geophysics*, 86, 17-28.

Bolève A., Revil A., Janod F., Mattiuzzo J.L. & Fry J.-J. (2009) Preferential fluid flow pathways in embankment dams imaged by self-potential tomography. *Near Surface Geophysics*, 7, 447-462.

Buck C.J. & Watters, R.J. (1986) *Acoustic emission generation from water flow through granular soils*, Proc., 22nd Symp. on Engineering Geology and Soils Engineering, Boise, Id., 138-154.

Butler D. K. (2005) *Near-Surface Geophysics - Investigations in Geophysics*. Tulsa: SEG, ISBN 978-1-56080-130-6, 732p.

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, 153-173.

Cardarelli E., Cercato M. & De Donno G. (2014) Characterization of an earth-filled dam through the combined use of electrical resistivity tomography, P- and SH-wave seismic tomography and surface wave data, *Journal of Applied Geophysics*, 106, 87-95.

Carlsten S., Johansson S. & Wörman A. (1995) Radar techniques for indicating internal erosion in embankment dams, *Journal of Applied Geophysics*, 33, 143-156.

Cho I.-K. & Ji-Yeon Yeom J.-Y. (2007) Crossline resistivity tomography for the delineation of anomalous seepage pathways in an embankment dam. *Geophysics*, 72(2), G31-G38.

Corwin R.F. (2005) *Self-Potential Field Data Acquisition Manual*, Report No. T992700-0205B/1, CEA Technologies Inc. (CEATI), Montreal.

Corwin, R.F. (1990) The Self-Potential Method for Environmental and Engineering Applications, *Investigations in Geophysics no. 5: Geotechnical and Environmental Geophysics (Vol 1)*, Society of Exploration Geophysicists, Tulsa, 127-145.

Cozzolino M., Di Giovanni E., Mauriello P., Piro S. & Zamuner D. (2018) *Geophysical Methods for Cultural Heritage Management*, ISBN 978-3-319-74790-3, Springer, Cham, 211p.

Dahlin, T., Sjö Dahl, P. & Johansson, S. (2008) *A Guide to Resistivity Investigation and Monitoring of Embankment Dams*, Report No. T992100-0205B/4, CEA Technologies Inc. (CEATI), Montreal, 84p.

Dahlin, T. & Zhou, B. (2006) Multiple-gradient array measurements for multichannel 2D resistivity imaging, *Near Surface Geophysics*, 4, 113-123.

Dahlin, T., Larsson, R., Leroux, V., Svensson, M. & Wisén, R. (2001) *Geofysik i släntstabilitetsutredningar*, Rapport 62, ISSN 0348-0755, ISRN SGI-R--01/62--SE, Statens Geotekniska Institut, Linköping, 67p.

- de Vries, G., Koelewijn, A. R. & Hopman, V. (2010) "Ijkdijk Full Scale Underseepage Erosion (Piping) Test: Evaluation of Innovative Sensor Technology" Proc. 5th Intl. Conference on Scour and Erosion, San Fransisco, ASCE, Reston, VA
- Ellefsen K., Wright D. & Lane J. (2002) Borehole seismic and radar methods characterize fractured bedrock, *USGS Mineral News*, 1(2).
- Fell R., MacGregor P., Stapledon D. & Bell G. (2005) Geotechnical engineering of embankment dams, A.A. Balkema, ISBN: 04-1536-440-x, 912p.
- FEMA (2015) Evaluation and Monitoring of Seepage and Internal Erosion Interagency Committee on Dam Safety (ICODS) FEMA P-1032 /May 2015.
- Foster M., Fell R. & Spannagle M. (2000) The statistics of embankment dam failures and accidents. *Canadian Geotechnical Journal* 37: 1000-1024.
- Gaffran P. & Jefferies M. (2005) *A Study of Through-dam Seismic Testing at WAC Bennet Dam*, Report No. T992700-0205E, CEA Technologies Inc. (CEATI), Montreal.
- Gaffran P.C. & Watts B.D. (2000) Geophysical investigations at WAC Bennett Dam, Procs. 2000 annual CGS conference, Montreal, Canada.
- Garner S. & Vazinkhoo S. (2007) *Analysis of Conventional Monitoring and Cross-Hole Seismic Data for Detection of Internal Erosion in an Earthfill Dam*, Assessment of the Risk of Internal Erosion of Water Retaining Structures: Dams, Dykes and Levees. Intermediate Report of the European Working Group of ICOLD, Deutsches Talsperren Komitee, Technical University of Munich, Nr.114 ISBN 1437-3513, ISBN 978-3-9404476-04-3, 154-166.
- Hadley, L.M. (1983): A Geophysical Method of Evaluating Existing Earth Embankments. *Bulletin of the Association of Engineering Geologists*, 20(3), 289-295.
- Hayles J.G., Hicks G.J. & Wittebolle R. (2005) *Engineering Seismic Surveys at a Test Embankment Near Seven Sisters, Manitoba*, Report No. T992700-0205D, CEA Technologies Inc. (CEATI), Montreal.
- Hughes A., Landstorfer F. & Eichiner H. (2018) *Durlassboden – Geophysical investigation, confirmed/verified by measurement results and exploration drillings*, Proc. ICOLD 26th Congress 86th Annual Meeting, 1-7 July 2018, Vienna, Austria.
- Hung M.-H., Lauchle G.C. & Wang M.C. (2009) Seepage-Induced Acoustic Emission in Granular Soils, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 566-572.
- Høeg K., Løvoll A. & Vaskinn K.A. (2004) Stability and Breaching of embankment dams; field tests on 6 m high dams, *International Journal of Hydropower and Dams*, Issue 5, 2004.
- ICOLD (in press) *Dam Surveillance guide*, ICOLD Bulletin 180.
- ICOLD (in press) *Dam Surveillance guide*, ICOLD Bulletin 158.

ICOLD (2015), *Internal erosion of existing dams, levees and dikes, and their foundations, Bulletin 164 Volume 1: Internal erosion processes and engineering assessment*, ICOLD Bulletin 164, 156p.

Ikard S. J., Revil A., Schmutz M., Karaoulis M., Jardani A. & Mooney M. (2014) Characterization of Focused Seepage Through an Earthfill Dam Using Geoelectrical Methods, *Ground Water*, 52(6), 952-965.

Imhof A.L., Calvo C.A. & Santamarina J.C. (2010) Seismic data inversión by cross-hole tomography using geometrically uniform spatial coverage, *Revista Brasileira de Geofísica*, 28(1), 79-88.

Johansson S & Sjö Dahl P (2017) *Fibre-optic temperature monitoring for seepage detection in embankment and tailings dams*, Proc. 85th ICOLD Annual Meeting, 3-7 July 2017, Prague, Czech Republic.

Johansson S. & Sjö Dahl P. (2009) *A Guide for seepage monitoring of embankment dams using temperature measurements*, Report No T062700-0214, CEA Technologies Inc. (CEATI), Montreal.

Johansson S., Nilsson Å., Garner S., Dahlin T., Friberg J. & Sjö Dahl P. (2005a) *Internal erosion detection at the Rössvatn test site – experiences from blind test using resistivity, self potential, temperature and visual inspection*, Elforsk rapport 05:42, 138p.

Johansson S., Friberg J., Claesson J., Dahlin T., Hellström G. & Zhou B. (2005b) *Investigation of geophysical methods for assessing seepage and internal erosion in embankment dams: A parameter study for internal erosion monitoring*, Report No T992700-0205A, CEA Technologies Inc. (CEATI), Montreal.

Johansson, S., Friberg, J., Dahlin, T. and Sjö Dahl, P. (2005c) *Long Term Resistivity and Self Potential Monitoring of Embankment Dams – Experiences from Hällby and Sädva Dams, Sweden*, Report 05:15, Elforsk, Stockholm, 123p.

Johansson, S (1997) *Seepage monitoring in embankment dams*. Doctoral Thesis, TRITA-AMI PHD 1014, ISBN 91-7170-792-1, Royal Institute of Technology, Stockholm.

Johansson S. & Dahlin T. (1996) Seepage monitoring in an earth embankment dam by repeated resistivity measurements, *European Journal of Engineering and Environmental Geophysics* 1(3): 229-247.

Johansson S., Bartsch M., Landin O., Barmen G., Dahlin T. & Ulriksen P. (1995) *Nyare metoder för tillståndskontroll av fyllningsdammar*, VASO dammkommittés rapport nr 21, ISSN 1400-7827, Stockholm, 71p.

Knödel, K., Lange, G. & Voigt, H.J. (2007) *Environmental Geology – Handbook of Field Methods and Case Studies*. Springer, 1357p.

Koelewijn, A., de Vries G., van Lottum H., Förster U., van Beek V. & Bezuijen A. (2014). *Full-scale testing of piping prevention measures: Three tests at the IJkdijk*, Physical Modelling in Geotechnics – Gaudin & White (Eds) 2014 Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-1-138-00152-7, 891-897.

Koelewijn A.R. & Peters D.J. (2012) *Design of IJkdijk All-in-One/Sensor Validation Test*, intern publ. ref. 1206242-000-GEO-0002-svb, www.deltares.nl/en/publications (2018-11-24), 22p.

Koerner R.M., McCabe W.M. & Baldivieso L.F. (1981) Acoustic emission monitoring of seepage, *J. Geotech. Engrg. Div.*, 107 4, 521–526.

Koerner R.M., Reif J.S. & Burlingame M.J. (1979) Detection methods for location of subsurface water and seepage, *J. Geotech. Engrg. Div.*, 105 11, 1301–1316.

Koerner R.M., Lord A.E., Jr. & McCabe, W.M. (1976) *Acoustic emission Microseismic monitoring of earth dams*, Proc., Conf. on Evaluation of Dam Safety, Pacific Grove, ASCE, New York, 274–291.

Lin C.-P., Hung Y.-C., Wu P.-L. & Yu Z.-H. (2014) Performance of 2-D ERT in Investigation of Abnormal Seepage: A Case Study at the Hsin-Shan Earth Dam in Taiwan. *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, 19(2), 101–112.

Livedijk (2018) www.floodcontrolijkdijk.nl/en/livedijken, webpreferens 2018-10-01.

Loke M.H., Chambers J.E., Rucker D.F., Kuras, O. & Wilkinson P.B. (2013). Recent developments in the direct-current geoelectrical imaging method. *Journal of Applied Geophysics*, 95, 135–156.

Maurya P.K., Balbarini N., Møller I., Rønde V., Christiansen A.V., Bjerg P.L., Auken E. & Fiandaca G. (2018) Subsurface imaging of water electrical conductivity, hydraulic permeability and lithology at contaminated sites by induced polarization. *Geophysical Journal International*, 213(2), 770–785.

Miller D., Parker T., Kashikar S., Todorov M. & Bostick T. (2012) *Vertical Seismic Profiling Using a Fibre-optic Cable as a Distributed Acoustic Sensor*, 74th EAGE Conference & Exhibition incorporating SPE EUROPEC 2012. Copenhagen, Denmark, 4-7 June 2012.

Minsley B.J., Burton B.L., Ikard S. & Power M.H. (2011) Hydrogeophysical Investigations at Hidden Dam, Raymond, California, *Journal of Environmental & Engineering Geophysics*, 16(4), 145–164.

Montgomery & Kofoed (2007) Rapid Seepage Diagnosis through Controlled Source – Audio Frequency Domain Magnetics, Procs. 14th German Dam Symposium and 7th ICOLD European Club Dam Symposium, 17-19 September 2017, Freising, Germany, ISBN: 978-3-940476-05-0, 239–243.

Moore J.R., Boleve A., Sanders J.W. & Glaser S.D. (2011) Self-potential investigation of moraine dam seepage. *Journal of Applied Geophysics*, 74, 277–286.

Oh S. (2012) Safety assessment of dams by analysis of the electrical properties of the embankment material, *Engineering Geology*, 129, 76–90.

Olsson P.-I., Fiandaca G., Juul Larsen J., Dahlin T. & Auken E. (2016) Doubling the spectrum of time-domain induced polarization by harmonic de-noising, drift correction, spike removal, tapered gating and data uncertainty estimation, *Geophysical Journal International*, 207(2): 774–784.

- Paillet F.L. & Ellefsen K.J. (2005) Downhole Applications of Geophysics. In D. K. Butler (Ed.), *Near-Surface Geophysics - Investigations in Geophysics*. Tulsa: SEG, ISBN 978-1-56080-130-6, pp.439-471.
- Park C.B., Miller R.D. & Xia J. (1999) Multichannel analysis of surface waves, *Geophysics*, 64(3), 800–808.
- Parker T., Shatalin S.V., Farhadiroushan M., Kamil Y.I., Gillies A., Finfer D. & Estathopoulos G. (2012) *Distributed Acoustic Sensing - A New Tool for Seismic Applications*, 74th EAGE Conference & Exhibition incorporating SPE EUROPEC 2012. Copenhagen, Denmark, 4-7 June 2012.
- Pelton J.R. (2005). Near-Surface Seismology: Surface Based Methods. In D. K. Butler (Ed.), *Near-Surface Geophysics - Investigations in Geophysics*. Tulsa: SEG, ISBN 978-1-56080-130-6, pp.219-263.
- Perzlmaier S., Aufleger M. & Dornstadter J. (2007) *Detection of internal erosion by means of the Active Temperature Method*, Assessment of the Risk of Internal Erosion of Water Retaining Structures: Dams, Dykes and Levees. Intermediate Report of the European Working Group of ICOLD Deutsches Talsperren Komitee, Technical University of Munich, Nr.114 ISBN 1437-3513, ISBN 978-3-9404476-04-3, 193-207.
- Pueyo Anchuela Ó., Frongiab P., Di Gregoriob F., Casas Sainza A.M. & Pocoví Juana A. (2018) Internal characterization of embankment dams using ground penetrating radar (GPR) and thermographic analysis: A case study of the Medau Zirimilis Dam (Sardinia, Italy); *Engineering Geology*, 237, 129-139.
- Reynolds J.M. (2011) *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics*, 2nd Edition, Wiley, ISBN: 978-0-471-48535-3, 710p.
- RIDAS (2012) Kraftföretagens riktlinjer för dammsäkerhet, Avsnitt 7.2 Fyllningsdammar Tillämpningsvägledning, daterad 2011-12-15, Svensk Energi, Stockholm, p63.
- Schuck, A. & Lange G. (2007) Seismic Methods, in Eds. Knödel, K., Lange, G. & Voigt, H.J., *Environmental Geology – Handbook of Field Methods and Case Studies*. Springer, 337 – 402.
- Seidel K. & Lange, G. (2007) Direct Current Resistivity Methods, in Eds. Knödel, K., Lange, G. & Voigt, H.J., *Environmental Geology – Handbook of Field Methods and Case Studies*. Springer, 205 – 238.
- Sekula K., Borecka A., Kessler D. & Majerski P. (2017) Smart Levee in Poland. Full Scale Monitoring Experimental Study of Levees by Different Methods, *Computer Science*, 18(4): 357-384.
- Sentenac P., Benes V. & Keenan H. (2018) Reservoir assessment using non-invasive geophysical techniques. *Environmental Earth Sciences*, 77:293.
- Sheffer M. R. & Oldenburg D. W. (2007) Three-dimensional modelling of streaming potential, *Geophysical Journal International*, 169, 839-848.

- Sjödahl P., Dahlin T. & Johansson S. (2010) Using the electrical resistivity method for leakage detection in a blind test at the Røssvatn embankment dam test facility in Norway, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 69:643–658.
- Sjödahl P., Dahlin T. & Johansson S. (2009) Estimating seepage flow from resistivity monitoring data at the Sädva embankment dam, *Near Surface Geophysics*, 7, 463–474.
- Sjödahl, P., Dahlin, T., Johansson, S. & Loke, M.H. (2008) Resistivity monitoring for leakage and internal erosion detection at Hällby embankment dam, *Journal of Applied Geophysics*, 65: 155–164.
- Sjödahl, P., Dahlin, T. & Zhou, B. (2006) 2.5D Modelling to Assess 3D Effects in Resistivity Imaging on Embankment Dams, *Geophysics*, 71(5), G107-G114.
- Sjödahl P., Dahlin T. & Johansson S. (2005) Using Resistivity Measurements for Dam Safety Evaluation at Enemossen Tailings Dam in Southern Sweden, *Environmental Geology*, 49(2), 267 - 273.
- Sjögren B. (1984) Shallow Refraction Seismics, Chapman & Hall, London, UK.
- Slater L.D. & Lesmes D. (2002) IP interpretation in environmental investigations, *Geophysics*, 67(1), 77-88.
- Socco V. & Strobbia C. (2004) Surface-wave method for near-surface characterization: a tutorial. *Near Surface Geophysics*, 2004, 165-185.
- Styles P. (2012) *Environmental Geophysics – Everything you wanted (needed) to know but were afraid to ask!*, European Association of Geoscientists & Engineers, Houten, ISBN 978-90-73834-33-0, 220p.
- Svensson M. & Friberg O. (2017) GeoBIM - a tool for optimal geotechnical design. in *Procs. 19th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Seoul 2017, 3p.
- Thompson S., Kulesa B. & Luckman A. (2012) Integrated electrical resistivity tomography (ERT) and self-potential (SP) techniques for assessing hydrological processes within glacial lake moraine dams. *Journal of Glaciology*, 58, 849-858.
- Topp G.C., Yanuka M., Zebchuk W.D. & Zegelin S. (1988) Determination of electrical conductivity using time domain reflectometry: soil and water experiments in coaxial lines, *Water Resour. Res.*, 24, 945-952.
- Triumf C., Thunehed H & Enström A. (1995) *Övervakning av tät kärnans funktion genom mätning av självpotential och resistivitet*, VASO dammkommittés rapport nr 23, Elforsk. Stockholm, 33p.
- USBR (2018) www.usbr.gov/ssle/damsafety/risk/methodology, USBR (U.S. Bureau of Reclamation) webbreferens 2018-11-25.
- Vattenfall (1988) *Jord-och stenfyllningsdammar*, ISBN 91-7186-271-4, Stockholm, 242p.
- VNKI (2005). "Flood Risks and Safety in the Netherlands (Floris), Floris study - Full report", ISBN 90-369-5604-9, www.helpdeskwater.nl, 94p.

Ward, S. H. (1990). Resistivity and induced polarization methods. *Geotechnical and environmental geophysics (Vol. 1)*. Society of Exploration Geophysicists, Tulsa.

Willowstick (2018) www.willowstick.com, webbreferens 2018-10-01.

Wisén R. & Christiansen A.V. (2005) Laterally and Mutually Constrained Inversion of Surface Wave Seismic Data and Resistivity Data, *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, 10(3), 251–262.

Zhou, B. & Dahlin, T (2003) Properties and Effects of Measurement Errors on 2D Resistivity Imaging Surveying, *Near Surface Geophysics*, 1(3), 105-117.

Zonge K., Wynn J., & Urquhart S. (2005). Resistivity, induced polarization, and complex resistivity. In D. K. Butler (Ed.), *Near-Surface Geophysics - Investigations in Geophysics*. Tulsa: SEG, ISBN 978-1-56080-130-6, pp.265-300.

Bilaga A: Temperatur

GRUNDMETODIK VID MÄTNING I DAMMAR

Många parametrar är temperaturberoende varför kännedom om temperaturen är av stor vikt vid de temperaturvariationer som förekommer i fyllningsdammar i svenskt klimat. Det material som påverkas mest är vattnet, där främst dess densitet, viskositet och termiska egenskaper beror av temperaturen. Av speciellt vikt är då temperaturen är i närheten av 0°C då frysning sker. Betydande förändringar sker också av viskositeten vid temperatur under 5°C.

Temperatures säsongsvariation kan också ge information om vattenströmningen genom dammen. Metoden baseras på jämförelse mellan temperatures säsongsvariation i magasinet med den temperatur som mäts i dammen under året. Denna metodik är numera vanligt förekommande vid övervakning av dammar och används oftast som komplement till andra metoder. Metoden kan även användas vid undersökning.

I vissa tillämpningar kan det vara fördelaktigt att tillföra värme och mäta den temperaturrespons som uppkommer. Detta ger information om vattenströmningen (och/eller markens termiska egenskaper, vilka antas konstanta). Denna metodik kallas ofta "aktiv metod" och är bäst lämpad vid undersökning, eller övervakning med låg mätfrekvens (ca 1-5 mätningar/vecka). Den kan lämpligen användas där den naturliga temperaturvariationen från vattenströmning är liten eller där betydande påverkan förekommer från exempelvis markytan.

MÄTMETODIK

Mätning kan göras i punkter genom manuella mätningar i vattenståndsrör på olika nivåer eller genom installation av temperaturgivare (exempelvis PT100 eller vibrerande sträng). Ofta placeras dessa på samma nivå som tryckgivarna. Vid manuella mätningar bör dessa göras med ungefär en gång per månad mellan minst april och oktober. Under övrig tid kan eventuellt glesare mätintervall användas.

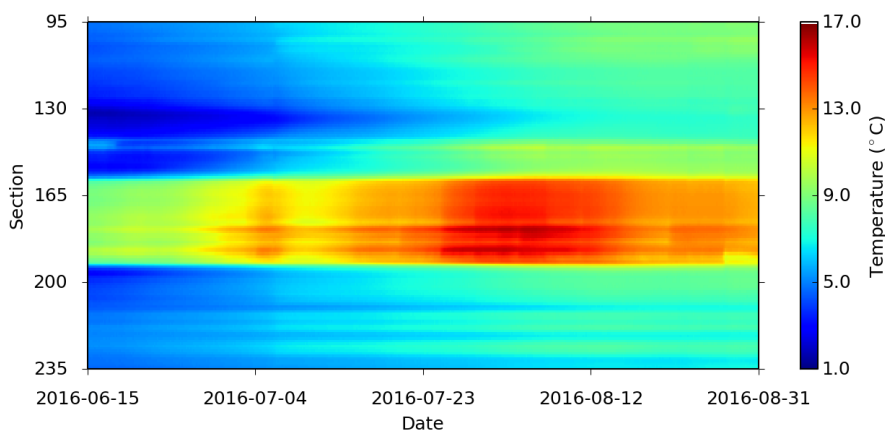
För mätningar på flera nivåer kan även temperaturlinor användas. Dessa består av en kedja av givare med ett inbördes avstånd av ca 1-3 m. Om mätpunkterna överstiger ca 100 stycken är temperaturmätning med optiska fiber ett alternativ. Med denna teknik kan mätning göras med hög upplösning (flera mätvärden per meter) och upp till ca 10 km längd. Den höga upplösningen är värdefull vid mätning i en stratifierad undergrund.

Med optiska fibrer kan temperaturmätning också göras längs dammen. Kablar kan installeras när dammen byggs och placeras då lämpligen i dammens nedströmsfilter, intill tät kärnan. Mätningar där ger information om var vattenströmningen genom tät kärnan mynnar. Var inströmningen sker kan däremot inte bestämmas, såvida inte mätning sker i dammens uppströmsfilter. Det vanligaste läget för optiska fiber är uppströms dränagesystemet, där kablar numera installeras standardmässigt vid ombyggnad av dränage eller komplettering med stödbank.

UTVÄRDERINGSMETODIK

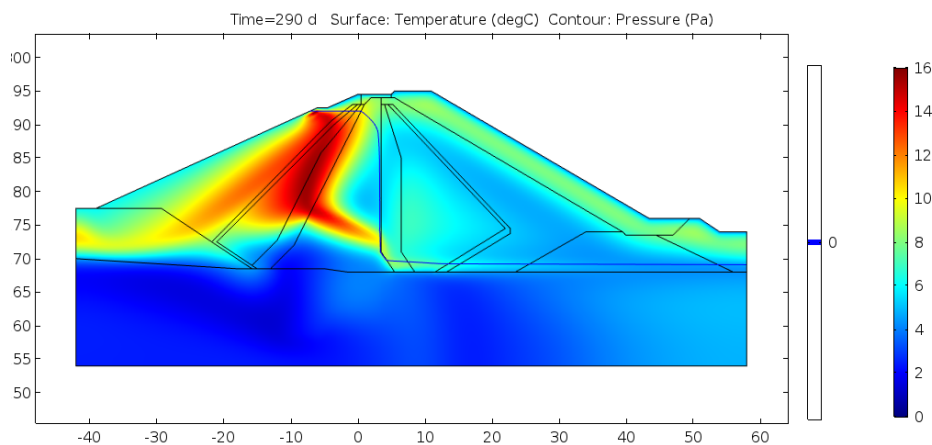
Utvärdering av data vid övervakning kan göras genom kvalitativ jämförelse av mätresultat från olika år, där en ökande temperaturvariation över flera år tyder på ett ökande läckage. Genom jämförelser av temperaturen för mätpunkter med liknande placering kan områden med större läckage identifieras. Detta gäller även vid analys av mätningar som gjorts i en vertikal profil. Denna metodik kan också användas vid enstaka undersökningar, även om det även här är fördelaktigt med mätningar vid några olika tidpunkter.

Samma angreppssätt kan användas vid utvärdering av mätningar som gjorts längs en damm. Områden med avvikande temperatur längs dammen, och i tiden kan då visas i en så kallad Waterfall-plot (Figur A 1, mellan sek 160 och 190). Av den framgår områden med jämförelsevis avvikande temperaturrespons respektive temperaturvariation under mätperioden. Från mätningarna är det också möjligt att upptäcka läckageförändringar samt i vissa fall även kvantifiera flödet.



Figur A 1 Temperatur mellan 2016-06-15 och 2016-08-31 mellan sek 0/095 och 0/235.

Utvärdering av vattenströmningen genom dammen kan göras på olika sätt. Bästa förståelse för tolkning fås genom numerisk modellering (Figur A 2). Förenklade utvärderingsmetoder är dock att föredra vid automatisk utvärdering av mätresultatet, vilket görs efter varje mätning.



Figur A 2 Resultat från termisk simulering av vattenströmning genom en damm med en zon med tio gånger högre genomsläpplighet i tåtkärnans nedre del än i övriga delar av tåtkärnan.

Bilaga B: Självpotential

ALLMÄNT

SP-metoden bygger på galvanisk mätning av existerande elektriska potentialer, med hjälp av två elektroder som flyttas runt i undersökningsområdet. Zoner med förhöjd vattengenomströmning i exempelvis en damm ger upphov till elektriska avvikelser. Med SP-mätning kan dessa zoner detekteras. Spänningarnas storlek beror av flera faktorer, där flödets storlek, korskopplingskoefficienten och markens resistivitet ingår (Sheffer & Oldenburg 2007). Genom den direkta kopplingen till vattenströmning har metoden stor potential, för såväl tillståndskontroll som övervakning med fast installerade elektroder.

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 därefter börjat användas för kartering av flöde från exempelvis läckande dammar i utlandet (USA, Frankrike, f.d. Sovjetunionen, etc.). Ett stort antal artiklar och rapporter redovisar positiva resultat med metoden för kartering av zoner med ökat grundvattenflöde, t.ex. Sentenac et al. (2018), Ikard et al. (2014), Moore et al. (2011), Minsley et al. (2011), Bolève et al. (2009), Corwin (1990), Butler & Llopis (1990). Mätförfarandet är relativt snabbt varför metoden ofta är kostnadseffektiv.

MÄTMETODIK

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 saltlösning baserad på samma metall (t.ex. koppar-koppar-sulfat, bly-blykorid). Dessa är trots namnet inte helt fria från polarisation. Som mätinstrument kan man normalt använda en digital multimeter av god kvalitet. Corwin (2005) har sammanställt en handbok för datainsamling för metoden i dammtillämpningar.

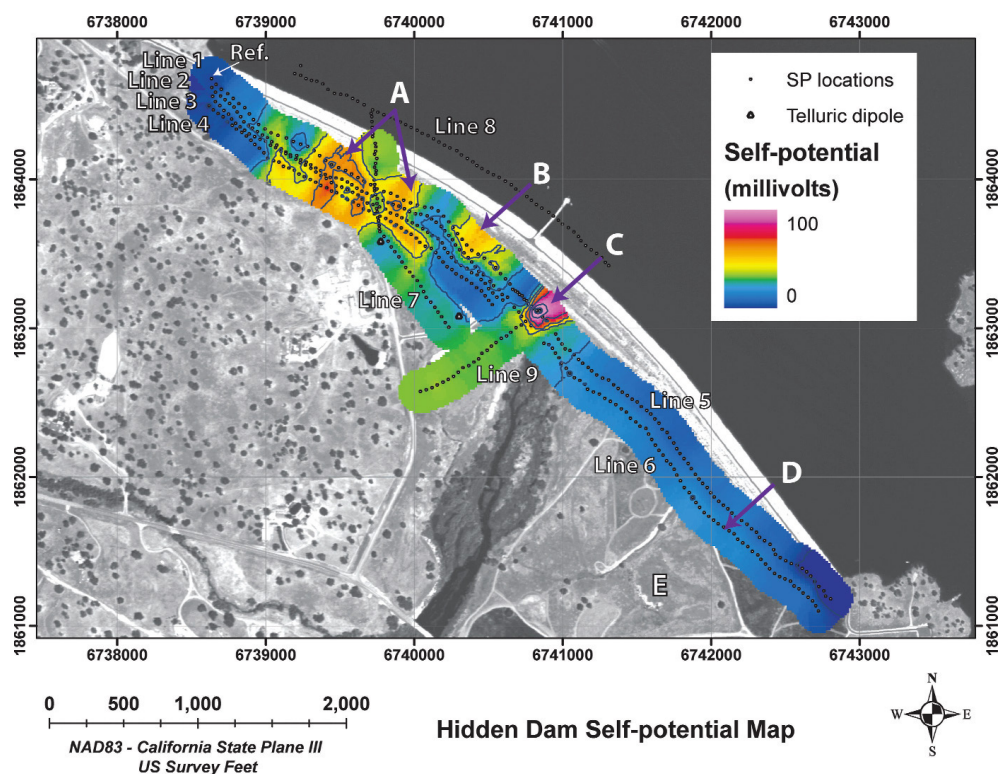
Det finns två sätt att samla in SP-data, gradienttekniken och totalfältstekniken. Gradienttekniken innebär att man har två elektroder med ett fixerat inbördes avstånd, en kabel med en längd som motsvarar elektrodavståndet samt en voltmeter. Vid flyttning framåt längs mätlinjen hamnar den bakre elektroden 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 på uppströmssidan av en damm, vilket gör att man kan mäta kontinuerligt utan problem med markkontakt.

Det finns många källor till brus som kan störa resultaten från SP-mätningar, och göra dem svårtolkade eller leda till feltolkningar. Exempelvis förekommer

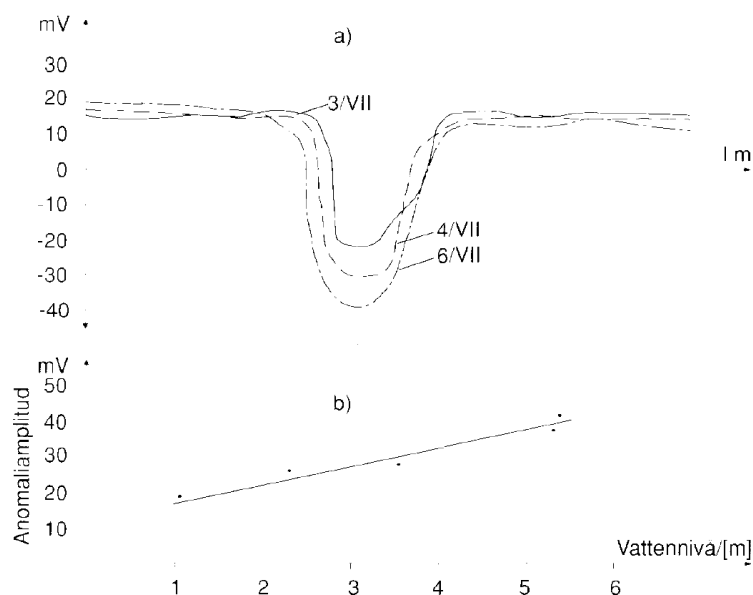
naturliga variationer i potentialnivåerna till följd av telluriska strömmar. Man kan kompensera för dessa om man registrerar variationerna mellan fasta elektroder samtidigt som mätningen pågår. Olika metallobjekt i marken kan ge utslag, och det kan vara till stor hjälp för tolkningen om dessa detekterats med hjälp av elektromagnetiska eller magnetiska mätningar. Vidare kan elektrodpolarisering ge upphov till svårbemästrat brus, varför valet av elektroder är avgörande för datakvaliteten. 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 exempel i Figur B 1. 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-anomalins storlek, se exempel i Figur B 2, varför en ökning av SP-anomaliens storlek i tiden kan tjäna som varningssignal för ökande läckage.



Figur B 1 Exempel på presentation av SP-undersökning där läckage på nedströmssidan av dammen framträder med höga potentialer (Minsley et al. 2011).



Figur B 2 Exempel på hur SP-utslagen kan variera beroende på vattennivå, och därmed flödets storlek, a) SP-profil före, under och efter nederbörd, b) anomalins amplitud som funktion av vattennivån (från Bogoslovsky och Ogilvy 1970).

Tredimensionell modellering av SP-avvikelser genererade av vattenflöde har beskrivits av Sheffer & Oldenburg (2007), vilket kan användas som ett steg i en metodik för tolkning av data. Bolève et al. (2009) har visat exempel på hur numerisk inversmodellering (inversion) kan användas för tolkning av SP-data där zonen med avvikande flöde kunnat lokaliseras, och där flödet kvantifierats inom en storleksordning. Modellering och inversion av SP-data kräver kännedom om resistiviteten, varför en SP-undersökning måste kombineras med resistivitetsundersökning för att det ska vara möjligt att göra en kvantitativ tolkning.

POTENTIAL OCH BEGRÄNSNINGAR

SP-metoden är en av de geofysiska metoder som har störst potential för detektering av dammläckage, 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 relativt dålig upplösning av zonens djupfördelning. 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 materialsammansättning kan resultaten förväntas vara mera kopplade till flödets storlek och hastighet, men inte direkt till förändringar i exempelvis porositeten. Dock kan en förändring i materialsammansättning påverka resistiviteten som i sin tur kan påverka SP-data. Genom kopplingen till flöde kan man också förvänta sig att SP-metoden ger utslag för såväl koncentrerade som mera diffusa flöden.

Metoden kan både användas för allmän tillståndskontroll och för uppföljning av indikationer från andra metoder, om man misstänker en förändring i ett parti av en damm kan man tänka sig en mera detaljerad mätuppläggning där. 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.

Test av metoden på svenska dammar har i flera fall rapporterats ha givit goda resultat (Berube 2004; Triumf et al. 1995), dock är verifiering generellt en bristvara. I en del fall har resultaten visat sig vara relativt svårtolkade p.g.a. störningar från metallobjekt och armerad betong i och i anslutning till fyllningsdammen (Johansson et al. 2005c; Berube 2004). Det finns inga enkla samband för uppskattning av känslighet för förändringar i flöden i förhållande till brusnivåer, och det vore här befogat med en kombination av numerisk modellering och praktiska försök.

Vid kontinuerlig övervakning med fasta elektroder har man goda förutsättningar att upptäcka små förändringar gentemot tidigare resultat. För korrekt tolkning av SP-resultat är det viktigt att ha tillgång till resultat från andra metoder, t.ex. resistivitet, vilket för övrigt gäller alla geofysiska metoder.

Bilaga C: Resistivitet

INLEDNING

Resistivitetsmetoden bygger på galvanisk mätning av markens resistivitet, eller specifika motstånd, vilket sker genom att sända en ström mellan två elektroder och mäta uppkomna potentialer mellan två andra elektroder.

Resistiviteten beror i huvudsak av vatten- och finmaterialinnehållet i marken, och en zon med förhöjt läckage kan på så vis avslöjas genom det ökade vatteninnehållet eller minskad finmaterialhalt. Metoden har stor potential för både tillståndskontroll och övervakning, det senare med hjälp av fast installerade elektroder. 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. Eventuellt lerinnehåll ger stor påverkan på resistiviteten, och lerhaltiga och organiska jordar har normalt låga resistiviteter.

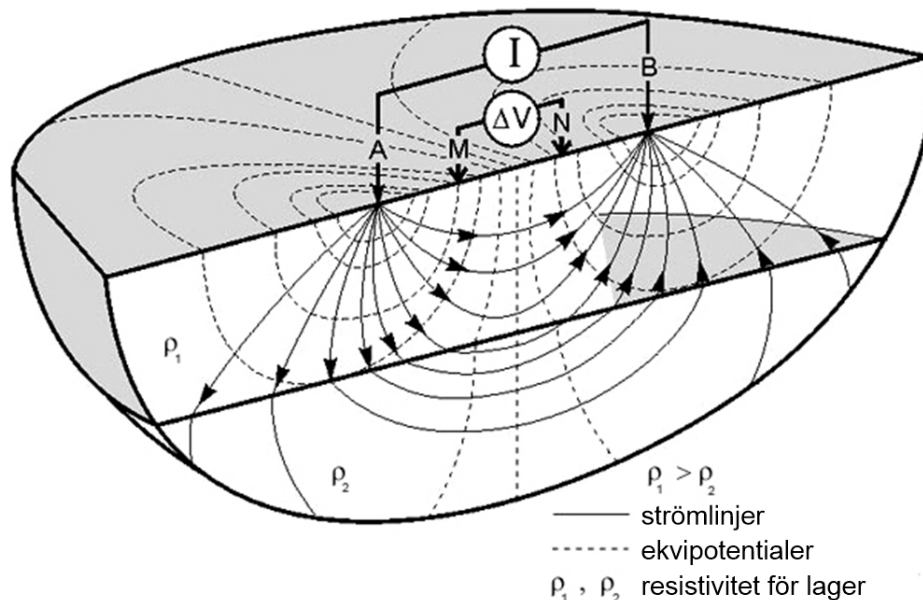
Resistiviteten är vidare beroende av temperaturen. Resistiviteten ökar med sjunkande temperatur beroende på minskad mobilitet hos jonerna i vattnet då viskositeten ökar, och vid tjäle ökar resistiviteten kraftigt. Ofta behöver man ej ta hänsyn till temperaturvariationer vid resistivitetsundersökningar. I fallet med jorddammar 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 8°C skulle ge en variation i resistiviteten på 25%. I de inre delarna av en damm är dock temperaturvariationerna väsentligt mindre, enligt mätningar samt beräkningar redovisade av Johansson (1997).

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. Ward (1990), Zonge et al. (2005), Seidel & Lange 2007; Reynolds (2011), Loke et al. (2013) och Binley (2015). Goda erfarenheter från undersökningar på fyllningsdammar har redovisats av bl.a. Sentenac et al. (2018), Ikard et al. (2014), Oh (2012), Sjödahl et al. (2009), Sjödahl et al. (2008), Cho & Yeom (2007) och Butler & Llopis (1990).

MÄTMETODIK

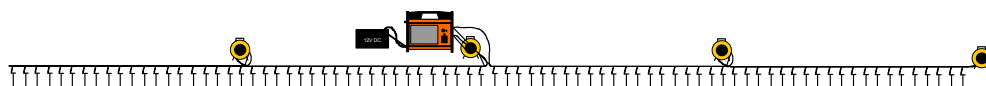
Mätningarna utförs genom att en kontrollerad ström sänds mellan två elektroder som stucks ned i marken, samtidigt som potentialfallet mäts mellan två andra elektroder (se Figur C 1). Oftast används elektroder av rostfritt stål för såväl ström- som potentialelektroder. Normalt används en fyrkantvåg med omväxlande polaritet, alltså en pulsad likström, för mätningarna. Genom att ta medelvärde av mätningar med omvänt polaritet minimerar man störningar från självpotentialer, och mätningarna utförs också så att man kan reducera påverkan från variation i bakgrundsspänningarna. Mätningen ger ett mått på resistansen med enheten ohm

(Ω). 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 placerats 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 varieras djupnedträngningen, och en normal mätsekvens innehåller därför mätningar med många olika elektrodavstånd. Notera dock att ström- och potentialfältet breder ut sig lika mycket i sidled som i djupled, vilket medför att variation i resistiviteten vid sidan om en undersökningslinje påverkar mätresultatet.



Figur C 1 Princip för elektrisk resistivetsmätning, där A och B är strömelektroder, medan M och N är potentialelektroder (modifierad från Seidel & Lange 2007).

Elektrodena kan placeras ut enligt många olika principer. Det är vanligt att elektroderna placeras på en linje med strömelektrodena ytterst, och potentialelektrodena symmetriskt placerade kring mittpunkten, som i Figur C 2. Två välkända metoder för detta har uppkallats efter Wenner respektive Schlumberger, dock är så kallad multipel gradientkonfiguration vanligast vid automatiserade multi-elektrodmätningar idag (Dahlin och Zhou 2006). I vissa fall kan andra elektrodkonfigurationer vara mera lämpade t.ex. pol-dipol som medger större djupnedträngning men kväver en s.k. fjärrelektrod för strömretur.



Figur C 2 Skiss på typiskt mätutlägg för multielektrodmätning, i detta fall med 81 elektroder.

Resistivitetsundersökningar utfördes förr som profilering eller sondering, men numera nästan uteslutande som elektrisk resistivitetstomografi (ERT) vilket kan ses som kombinerad profilering-sondering. Det senare kallas ibland även CVES (Continuous Vertical Electrical Sounding). Moderna mätinstrument innehåller normalt en strömsändare, flera mätkanaler och en inbyggd reläomkopplare, samt en mikrodator som styr mätprocessen. Instrumentet ansluts i allmänhet till flera tiotal elektroder via multielektrodkablar, varefter instrumentet automatiserat mäter hundratal eller tusentals elektrodkombinationer enligt en fördefinierad mätsekvens. Flera mätkanaler används för att snabba upp mätprocessen. Datorstyrd mätning kan göras helt automatiskt om man har ett system av fast installerade elektroder. Vid tidsseriemätningar är det av största vikt att elektrodplaceringen är identisk mellan mättillfällena, vilket bäst säkerställs med 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, p.g.a. 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 Zhou & Dahlin (2003) visar att medelmätfelet med ett standardinstrument vid god elektrodkontakt normalt ligger under 1 %, dock kan det bli betydande vid dålig elektrodkontakt.

Resistivitetsmätningar kan även användas för borrhålstomografi, där data samlas in i två eller tre dimensioner genom elektroder i borrhål, eventuellt i kombination längs ytan. I fallet undersökning av jorddammar 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. En intressant möjlighet vore att installera horisontella elektrodsträngar i uppströms- och nedströmsfiltret, främst i botten av dammen men för högre dammar eventuellt även på mellanliggande nivåer.

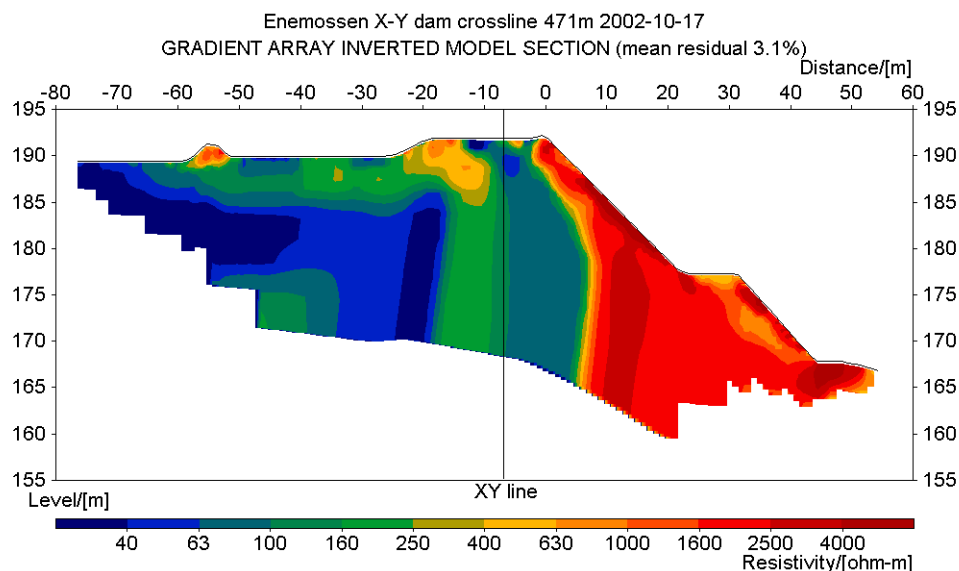
UTVÄRDERINGSMETODIK

Kvalitetsbedömning av data sker ofta genom att data ritas upp i s.k. multiprofil-diagram eller pseudosektioner. På så vis kan man identifiera data med avvikande datakvalitet och avlägsna dessa för att undvika artefakter i de inverterade modellerna.

Tolkning av resistivitetsdata sker genom inversmodellering, s.k. inversion, där en finita element (FEM) eller finita differens (FD) modell optimeras för att ge ett modellsvar som så väl som möjligt liknar uppmätta data. Detta sker iterativt i ett antal steg. Beroende på hur mätdata samlats in kan man skapa tvådimensionella (2D) eller tredimensionella (3D) modeller. För tolkning av data mätta längs en linje använder man en tolkningsmodell som bygger på antagandet att resistivitetsfördelningen i marken är tvådimensionell (2D), dvs. resistiviteten varierar längs

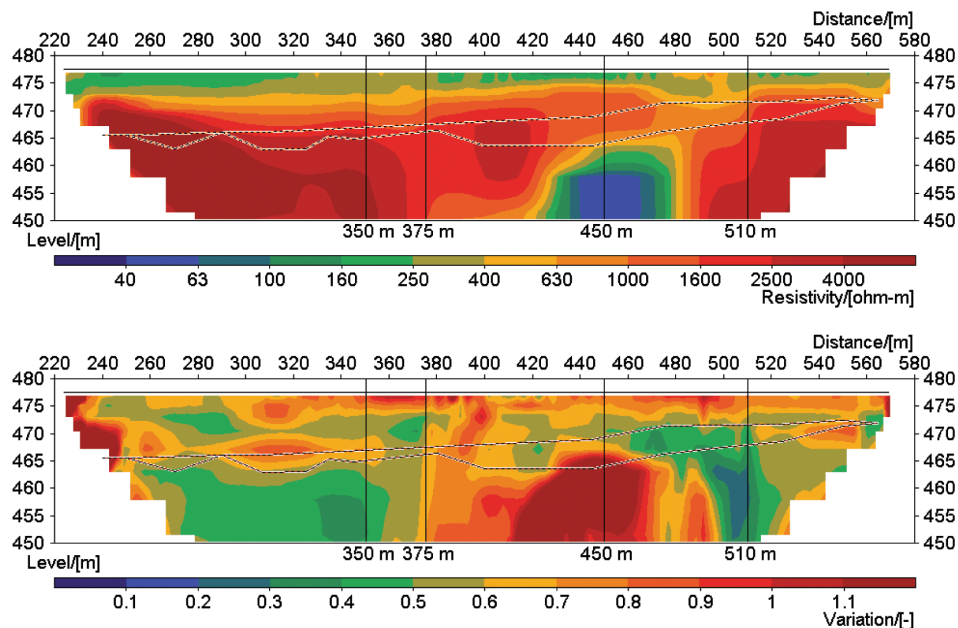
linjen och mot djupt, men är konstant i riktningen tvärs mätutlägget. Om resistiviteten i verkligheten varierar vid sidan om mätlinjen ger det upphov till så kallade 3D-effekter som ger upphov till skenbara variationer i de djupare delarna av tolkningsmodellen. Vid mätning längs dammkrön på typiska fyllningsdammar med tät kärna med hög finmaterialhalt uppstår stora 3D-effekter (t.ex. Sjödahl et al. 2006).

Figur C 3 visar ett exempel på en inverterad tvärsektion mätt över Enemossens gruvdamm vid Zinkgruvan, där olika zoner i dammen och sandmagasinet avtecknar sig med olika resistivitet. De delarna av dammen har olika resistivitet som följd av skillnader i materialsammansättning och vatteninnehåll, med en finkorning konduktiv kärna och en dränerande stödfyllning av sprängsten. Grundvattenytans läge framträder i sandmagasinet tack vare den något grövre välsorterade sanden som dammkroppen byggs vidare på (inåtdamm).

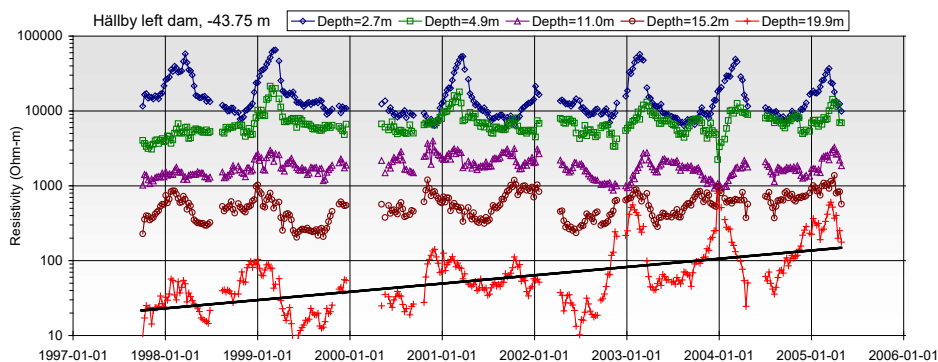


Figur C 3 Exempel på presentation av resistivitetsundersökning (ERT) i en gruvdamm (Sjödahl et al. 2005).

Förändringar av resistiviteten i tiden i fyllningsdammar kan generellt hänföras främst till förändringar i finmaterialhalt, porositet, vattennivå och temperatur. Genom analys av tidsserier av data är det möjligt att särskilja förändringar till följd av inre erosion från temperatur- och vattennivåförändringar. Figur C 4 visar ett exempel på medelresistivitet och relativ variation från en relativt långsträckt och låg damm, där en zon med högre variation framträder kring avstånd 450 m. Den lägre resistiviteten och högre variationen tyder i detta fall på en zon i berggrunden, under dammens grundläggningsnivå, med avvikande egenskaper och förhöjt läckage. Variationen i tid för enskilda celler kan ritas upp och analyseras (exempel i Figur C 5), vilket kan användas för att detektera inre erosion samt uppskatta läckflödets storlek (Sjödahl et al. 2009).



Figur C 4 Exempel på resultat från långtidsmätning med resistivitet längs en långsträckt relativt låg damm. Den övre sektion visar genomsnittlig resistivitet under perioden, medan den nedre visar relativ variation (Sjödahl et al. 2009).



Figur C 5 Exempel på variation i tiden för resistivitet i utvalda celler i den inverterade modellen, där årstidsvariation är uppenbara för samtliga nivåer samt en tydlig trend för den djupaste nivån (röd) (Sjödahl et al. 2008).

POTENTIAL OCH BEGRÄNSNINGAR

Resistivitmätning är en metod som är mycket intressant för undersökning av jorddammar, genom att resistiviteten beror av vattenhalten i marken och därmed kan ge indikation på förändringar i porositeten och materialsammansättning. Man kan genom mätningar med elektroder placerade på ytan få en uppfattning om variationerna i elektriska egenskaper mot djupet, där dock förmågan att upplösa 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 eller längs horisontella utlägg i uppströms- och nedströmsfiltret.

Metoden kan användas för såväl generell övervakning som specifik undersökning efter indikationer från andra observationer, 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 är väl lämpad för automatiserad övervakning med hjälp av permanent installerade elektroder och kablar, och ett sådant system kan integreras med ett system för SP-mätning. Dock kan optimala elektrodplaceringar skilja sig åt mellan metoderna.

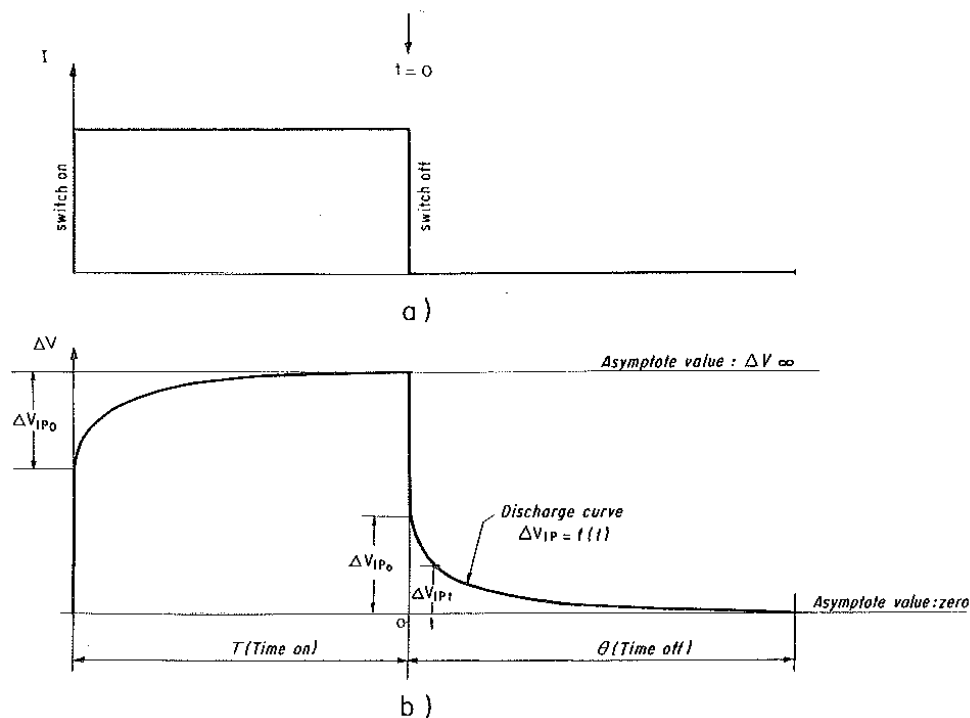
Genom kontinuerlig övervakning med fasta elektroder kan de naturliga säsongsvariationerna identifieras, och mindre förändringar av resultaten i tiden bli signifikanta. Exempelvis kan man om en jorrdamm är oskadd förvänta sig ett ganska jämnt fördelat vattenflöde genom dammen, och därmed jämnt fördelade temperaturförändringar i dammen. Om något parti av dammen skadas av inre erosion leder detta till att den hydrauliska konduktiviteten ökar, vilket ökar vattengenomströmningen lokalt. Resistiviteten i det skadade partiet förändras genom att finmaterialhalten minskar och porositeten ökar i förhållande till omgivande intakta material, där den kan öka eller minska beroende på vattnets och finmateriallets respektive ledningsförmåga. Den ökade vattengenomströmningen gör att temperaturvariationerna ökar, vilket i sin tur ger upphov till resistivitetsvariationer, vilket gör att man kan förvänta sig en större säsongsvariation av resistiviteten i ett skadat parti.

Bilaga D: Inducerad Polarisation

INLEDNING

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.

Vid strömsändning går det en viss tid efter strömmen kopplats på innan spänningen vuxit till ett stationärt värde, vidare försvinner inte spänningen ögonblickligen efter strömmen slagits från, som visas i Figur D 1. 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, normalt några hundra millisekunder. IP-mätning kan sägas vara en variant av resistivitetsmätning där även frekvensberoende information mäts.



Figur D 1 Skiss visande IP-fenomenet: a) utsänd ström, b) alstrad elektrisk potential (Bertin & Loeb 1976).

Förutom malmprospektering, där olika malmineral kan ge upphov till kraftiga IP-effekter, har metoden använts för kartering i samband med grundvatten, föroreningar i mark och gamla avfallsdeponier. 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 av bland annat Ward (1990), Zonge et al. (2005), Reynolds (2011) och Binley (2015).

Koppling till hydrauliska egenskaper och spektrala IP egenskaper (se beskrivning nedan) har tidigare påvisats i laboratoriemätningar. Nyligen har även en metodik för att uppskatta hydrauliska egenskaper från spektrala IP-data mätta i tidsdomän i fältskala presenterats (Maurya et al. 2018).

MÄTMETODIK

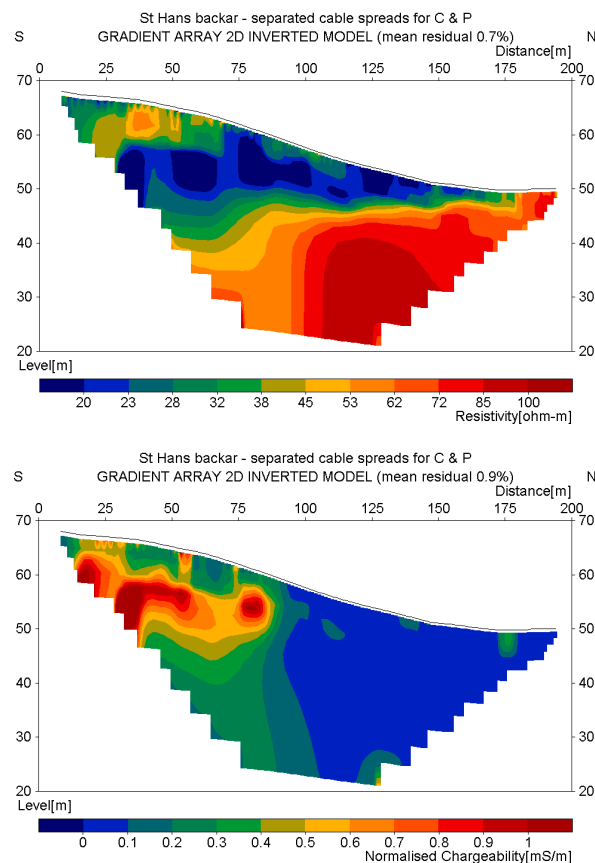
IP-mätning kan utföras på två olika sätt: transientmätning eller frekvensmätning. Vid transientmätning använder man en fyrkantvåg med omväxlande polaritet, och mäter avklingningsförloppet efter att strömmen stängts av. Avklingningsförloppet ger ett mått på polariserbarheten i marken. Vid frekvensmätning mäter man resistiviteten vid två eller fler frekvenser, ofta i intervallet 0.03-3 Hz. Förhållandet mellan resistiviteterna mätta vid olika frekvens kallas frekvenseffekt. Vid så kallad spektral IP mäter man i ett bredare frekvensintervall, men spektral IP i frekvensdomän är mycket tidsödande och tillgänglig utrustning mindre fältmässig. Tack vare teknisk utveckling finns det numera mätinstrument som kan mäta spektral IP i tidsdomän samtidigt med resistivitet (Olsson et al. 2016), men det krävs längre mättider för att erhålla den spektrala informationen. Beskrivningen som följer avser tidsdomän.

Mätförfarandet för IP-mätning är i princip detsamma som för resistivitetsmätning: profilering, sondering eller tomografi (IPT) via multielektrodmätning. 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 förr måste använda icke-polariserbara elektroder för potentialmätningen, men med moderna mätinstrument går det bra med elektroder av exempelvis rostfritt stål. Mätning under icke-stationära förhållanden gör bland annat att man lätt får problem med elektromagnetisk koppling, vilket kan delas upp i kapacitiv koppling och induktiv koppling. Kapacitiv koppling i de många ledarna i ett kabelsystem för multielektrodmätning kan leda till stora mätfel i miljöer med dålig elektrodkontakt, och elektrodkontakten är därför ofta den viktigaste faktorn för datakvalitet. En vanlig tumregel är att kontaktresistansen helst ska ligga under 1 k Ω . Induktiv koppling kan vara ett problem i konduktiva, dvs. lågresistiva, miljöer. Koppling till ledande objekt såsom elkablar, metallstaket, etc., kan också ge problem.

UTVÄRDERINGSMETODIK

Tolkningen av IP-data görs i princip på samma sätt som för resistivitetsdata, dvs. inversmodellering (inversion). IP-mätningar ger alltid även resistivitetsdata, och det finns tolkningsprogram som inkluderar IP-effekterna såväl som resistiviteten. Figur D 2 visar ett exempel på resultat av en kombinerad resistivitet-IP-undersökning över en f.d. soptipp, där låga resistiviteter orsakas av lakvattenläckage och höga normaliserade IP-värden orsakas av begravt avfall. Det flesta

vanligt förekommande programvarorna stödjer för närvarande integrerad IP-effekt, men inte spektral IP. Det är relativt vanligt att man presenterar resultaten som normaliserad IP-effekt som man får genom att dividera IP-värdet med resistiviteten, som i Figur D 2, för att få ett resultat som bättre svarar mot ytledningsförmågan i materialet (Slater & Lesmes 2002).



Figur D 2 Exempel på resultat av kombinerad resistivitet- (överst) och IP-undersökning (nederst).

POTENTIAL OCH BEGRÄNSNINGAR

IP-metoden kan vara intressant för dammundersökningar, för att ge mera nyanserad information om materialegenskaperna än vad enbart resistivitet kan ge. Den ytterligare information som erhålls vid IP-mätning, förutom vanlig resistivitet, skulle kunna vara relevant då den kopplar till de hydrauliska egenskaperna i materialet. IP-data kan också ge användbar kompletterande information vid ERT för lokalisering av möjliga läckagevägar under dammen uppström- och nedströms dammen.

Med moderna mätinstrument får man IP-data på köpet. Dock är IP mera känsligt för störningar vilket gör att det är svårare att samla in data av god kvalitet än för resistivitet, och mätförfarandet är mera tidsödande om man ska få ett brett spektralt innehåll i mätdata. För övervakning med fast installerade elektroder torde det vara väl värt att inkludera IP-mätning, och beroende på erhållen datakvalitet kan man i samband med utvärderingen av data avgöra om det är

motiverat med en fördjupad analys och tolkning av IP-data eller om man ska nöja sig med att göra det för resistivitetsdata.

Bilaga E: Refraktionsseismik

INLEDNING

Refraktionsseismik bygger på registrering av utbredningshastigheten för elastiska vågrörelser i marken. Vid seismiska mätningar med refraktionsmetoden utnyttjas P- och S-vågor. Refraktionsmetoden kan vara lämplig för att vid tillståndskontroll översiktligt lokalisera dåligt kompakterade delar i en fyllningsdamm, sprickor i omgivande berg och andra porösa och vattenfyllda svaghetszoner.

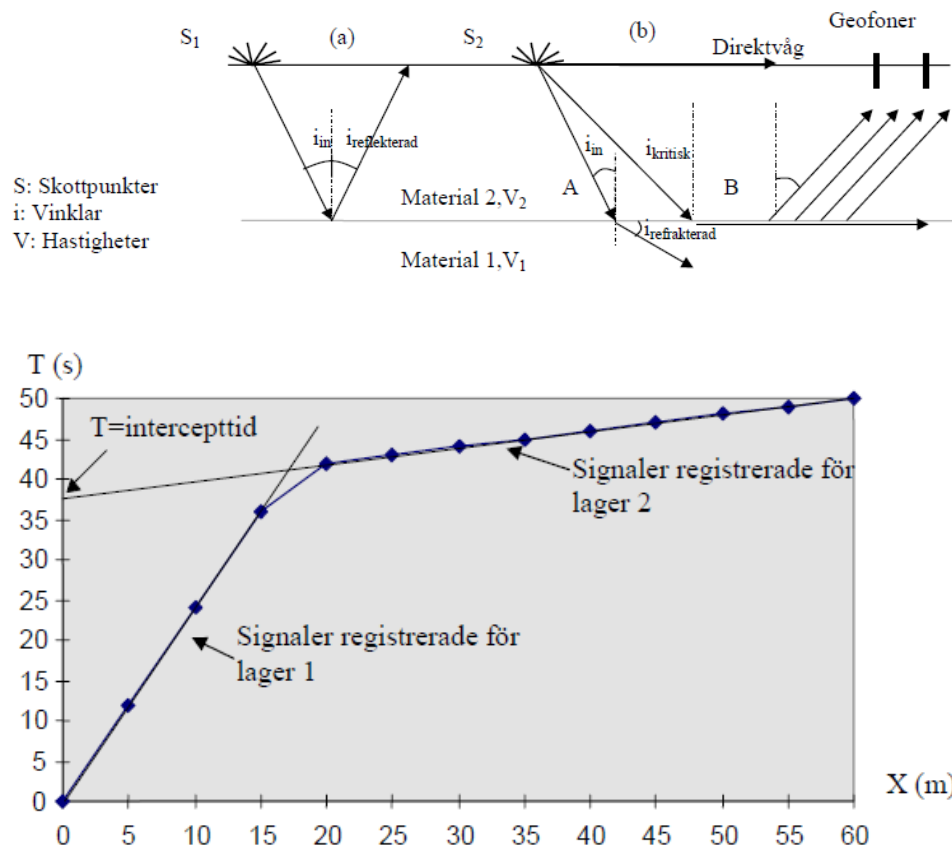
Studier av variationer i utbredningshastigheten för kompressionsvågor i dammkroppar kan användas för att detektera och lokalisera grundvattennivåer och läckagezoner. Vattenfyllda sprickor i berggrunden under och kring en damm kan också upptäckas genom att jämföra utbredningen av P- och S-vågor. S-vågor dämpas nämligen mycket kraftigare än P-vågor av vattenmättat material.

Enligt Bogoslovsky & 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 jorrdammar och för att detektera svaghets- och läckagezoner.

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 (Figur E 1). 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. Detaljerade beskrivningar av refraktionsseismik ges bland annat av Reynolds (2011), Schuck & Lange (2007), Pelton (2005) och Sjögren (1984), vilka detta avsnitt baseras på tillsammans med Johansson et al. (1995).

Elastiska vågor alstras, vanligen med hjälp av sprängämne, slägga eller fallvikt för P-vågor, och registreras i mottagare, så kallade geofoner. Dessa placeras normalt i linje med jämna mellanrum och ansluts till en digital seismograf. Det är möjligt att använda s.k. landstreamer med geofonerna monterade på ett textilband för att effektivt kunna lägga ut och flytta geofonutlägget. För att få bra signal/brusförhållande överlagras ofta flera registreringar från samma punkt, så kallad stackning. Oavsett vilken signalkälla man använder refererar man till positionerna där signalen alstras som skottpunkter. Vågkällan och/eller mottagarna kan också placeras i ett eller flera borrhål. S-vågor kan alstras med hjälp av en vibrator eller med fallvikt som slår på en belastad balk eller liknande som ligger på marken. Avståndet mellan våggenerator och registreringspunkt är stort i förhållande till det djup man vill undersöka. Mätningarna kan också utföras under vatten, och då använder man normalt bottenförlagda hydrofoner som sensorer.



Figur E 1 Princip för refraktionsseismik med vågutbredning för första ankomst av den seismiska vågen, P-vågen, (överst), och gångtidsdiagram (nederst) (Dahlin et al. 2001).

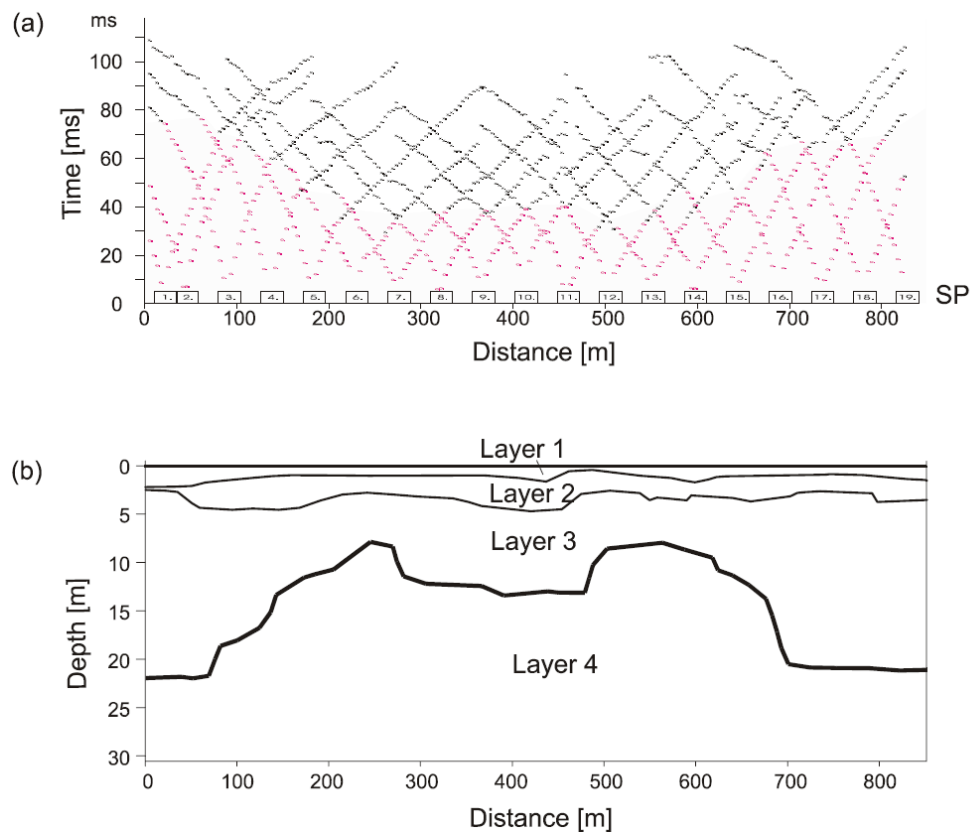
För att kunna detektera lutande lager krävs det att man har skottpunkter på båda sidorna om geofonutlägget. Vidare har man normalt skottpunkter inne i utlägget mellan geofonerna, och på olika avstånd utanför utlägget. De olika skottpunkterna bidrar tillsammans till att man kan bestämma både variation i jorddjup, eller en övre bergartsenhet eller uppsprucken / vittrad zon, och variation i berghastighet. Undersökningarna kan också utföras som så kallad seismisk refractionstomografi (SRT), vilket kräver att det är betydligt tätare mellan skottpunkterna.

UTVÄRDERINGSMETODIK

De registrerade signalerna används för att upprätta gångtidsdiagram för de studerade elastiska vågorna baserat på den så kallade första ankomsttiden, dvs. den tidigaste ankommande delen av den alstrade vågen. Det finns automatiska rutiner för att plocka första ankomsttiden, men det krävs att en erfaren geofysiker kvalitetsgranskar och justerar ankomsttiderna manuellt för att man ska få tillförlitliga resultat.

Gångtidsdiagrammen utvärderas med speciella utvärderings- och tolkningsprogram, som skapar en geofysisk-seismisk modell bestående av lager med olika vågutbredningshastighet. Vanliga metoder är Hagedoorns plus-

minusmetod och GRM (Generalized Reciprocal Method). Ett exempel på en sådan modell visas i Figur E 2.

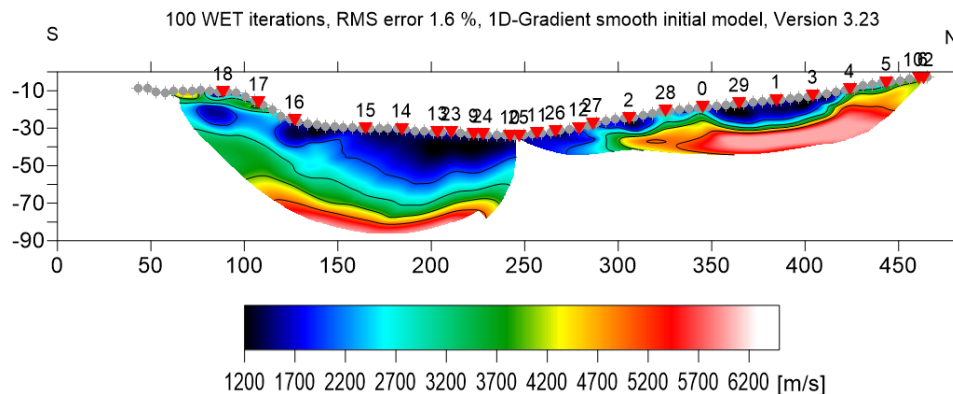


Figur E 2 Exempel på; a) diagram med första ankomsttider, och b) tolkad hastighetsmodell (Schuck & Lange 2007).

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. Dessa metoder fungerar bra i fall när det är relativt renodlade lagerföljder och distinkta övergångar mellan lagren med olika hastighet.

I mera komplexa undersökningsobjekt, med t.ex. laterala hastighetsvariationer och gradvisa övergångar i hastigheterna, kan SRT vara ett bra alternativ. Notera dock att hastighetsmodellerna från SRT alltid har gradvisa övergångar i hastighet oavsett om de i verkligheten är skarpa eller ej.

Den geofysiska modellen kan slutligen tolkas som en kvantitativ beskrivning av markens uppbyggnad under mätplatsen. För att få goda resultat fordras ofta en jämförelse/kalibrering med observationer från borrhål på mätplatsen. Ett exempel på resultat vad avser gånghastigheter visas i Figur E 3.



Figur E 3 Exempel på resultat från refraktionsseismisk tomografi på sjöbotten, där de låga hastigheterna i de övre delarna svarar mot lösa sediment.

POTENTIAL OCH BEGRÄNSNINGAR

Refraktionsmetoden är lämplig för att översiktligt lokalisera dåligt kompakterade delar i en fyllningsdamm, sprickzoner i omgivande berg och andra porösa och vattenfyllda svaghetszoner.

För att refraktionsmetoden ska vara fullt användbar krävs att de material som man vill särskilja separeras har olika 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 dålig för att med framgång studera punktformiga förändringar i dammar eller variationer orienterade i plan med någon eller några få meters tjocklek.

En annan begränsning vid refraktionsseismiska mätningar är att P-vågen är den del av den seismiska vågen som har minst amplitud, och därmed lättast drunknar i brus. Den utsända energin från vågkällan får inte vara så stor att dammen riskerar att skadas. Därför är sprängladdningar som signalkälla olämpliga. Tryckvågorna får alstras med exempelvis slägga eller fallvikt istället, vilket kan minska djupnedträngningen och möjligheterna att få god upplösning i resultaten. Ett vanligt problem på fyllningsdammar är också att ytlagren dämpar de seismiska signalerna kraftigt (Cardarelli et al. 2014).

Bilaga F: Ytvågsseismik

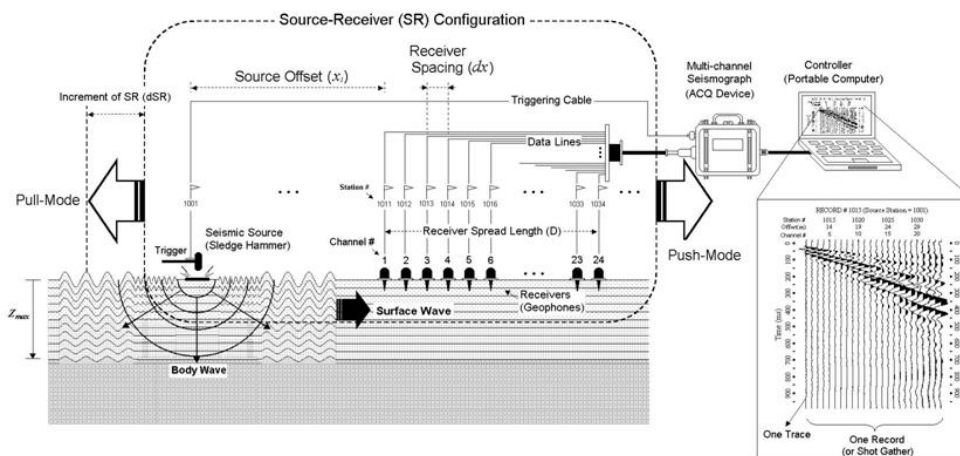
INLEDNING

Ytvågsseismik bygger på att ytvågor av olika frekvens breder ut sig med olika hastighet. Vidare att olika frekvenser har olika djuppenetration, där låga frekvenser tränger djupare än höga. Genom att registrera ytvågor och analysera deras frekvensinnehåll med hjälp av dispersionskurvor kan man bestämma fashastigheterna som funktion av frekvens. Skjuvvågshastighetens fördelning mot djupet kan därefter uppskattas med hjälp av inversmodellering.

Skjuvvågshastigheten har en direkt koppling till de mekaniska egenskaperna, och tillsammans med kännedom om det undersökta materialets densitet kan man beräkna dess skjuvmodul, dvs. styvhet. Vid tillståndskontroll kan metoden förväntas ge bättre noggrannhet och upplösning vid diffusa förändringar av packningsgrad och densitet än övriga beskrivna akustiska metoder. Eftersom ytvågorna är energirika, de innehåller mer än 2/3 av den totala energin i den seismiska vågen, är metoden förhållandevis robust och kan användas i en del miljöer där andra seismiska metoder har problem med signal-brusnivån.

METODBESKRIVNING

Undersökningen utförs numera oftast som MASW (multi-channel analysis of surface waves), där man använder geofoner som man placerar ut med jämna mellanrum längs en linje (Figur F 1). Det är möjligt att använda s.k. landstreamer med geofonerna monterade på ett textilband för att effektivt kunna lägga ut och flytta geofonutlägget. Eftersom ytvågorna är lågfrekventa bör man använda geofoner med låg resonansfrekvens, vilket oftast är 4,5 Hz. Som signalkälla kan man använda sprängladdningar, slägga, fallvikt eller vibrator. Det är också möjligt att använda brus som signalkälla, men det kan kräva andra geofonuppställningar vilket inte beskrivs här (Socco & Strobbia 2004; Park et al. 1999).

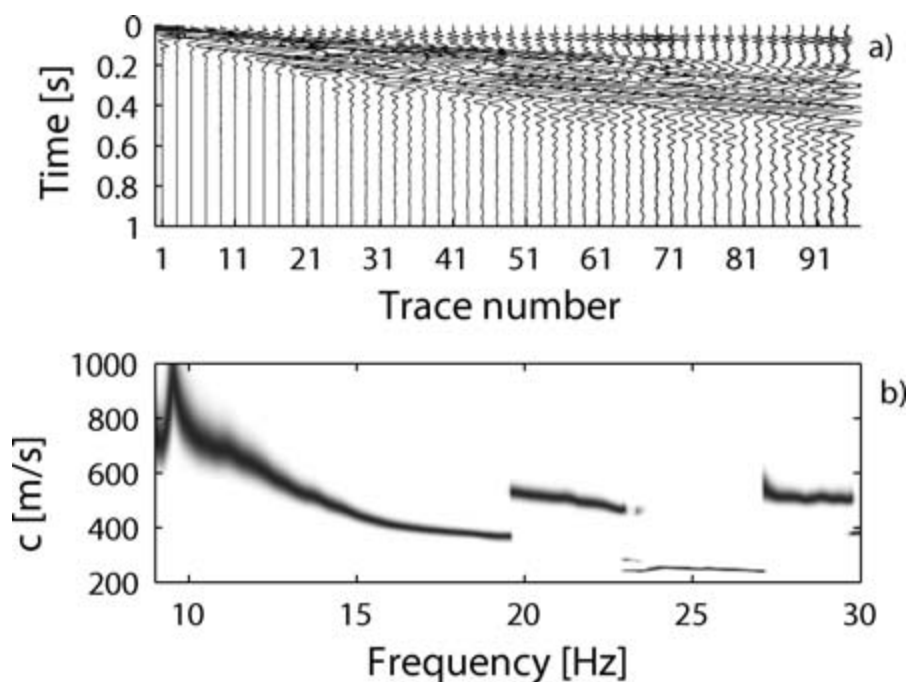


Figur F 1 Principskiss för ytvågsseismisk undersökning med MASW-metoden (<http://www.masw.com/DataAcquisition.html>).

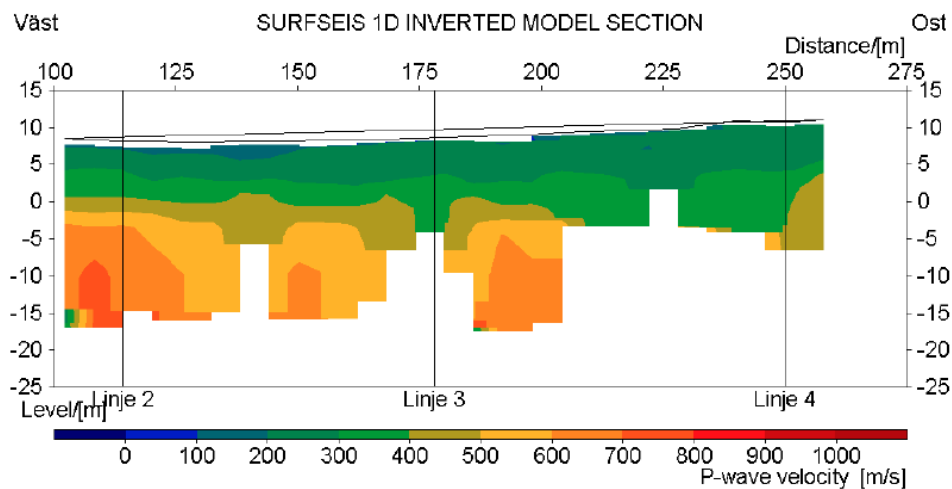
Man använder skottpunkter utanför geofonutlägget, normalt från båda hållen. Vid längre geofonutlägg kan man också ha skottpunkter inne i utlägget och analysera data för grupper av geofoner på ömse sidor om skottpunkten.

UTVÄRDERINGSMETODIK

Data samlas in till s.k. "shot records", vilket visar amplituden som funktion av tid för samtliga mätkanaler (Figur F 2). Data ritas därefter upp i diagram med fashastigheten som funktion av frekvensen, vilket ger de s.k. dispersionskurvorna. Dispersionskurvorna kan tolkas överslagsmässigt manuellt, men för en kvantitativ modelltolkning används inversmodellering. För inversmodelleringen måste man anta en densitet för materialet, samt Poissons tal. Programmet justerar sedan iterativt hastighet och mäktighet på lagren i modellen tills en tillräckligt god passning mellan beräknad och uppmätt dispersionskurva uppnås. Modelltolkningen resulterar således i en lageruppbyggd modell som visar skjuvvågshastighetens fördelning mot djupet (Figur F 3).



Figur F 2 Exempel på "shot gather" (överst) och frekvens – fashastighetsdiagram med dispersionskurvor (nederst) (Wisén & Christiansen 2005).



Figur F 3 Exempel på inverterad modellsektion baserad på interpolation mellan näraliggande 1D-modeller (Dahlin et al. 2001).

POTENTIAL OCH BEGRÄNSNINGAR

Ytvågseismik används för mätning av packningsgrad i fyllning och markstabilisering, samt för tillståndskontroll av hårdgjorda ytor. Metoden har potential för upplösning av diffusa förändringar av packningsgrad eller täthet i en dammkropp (Cardarelli et al. 2014), men det kan visa sig svårt att hantera geometrin i typiska fyllingsdammar. En begränsning för metoden är att tolkningsprogrammen idag endast medger endimensionella tolkningsmodeller. I en fyllningsdamm kan resultaten, speciellt för mätningar på lite större djup, bli svårtolkade p.g.a. att dammens geometri påverkar vågornas utbredning (Bièvre et al. 2017).

En fördel med metoden är att signalstyrkan tack vare det stora energiinnehållet i ytvågorna är bra jämfört med övriga seismiska metoder. Tack vare detta är signalgenereringen mindre kritisk, och slägga eller fallvikt är ofta bra alternativ. Användning av brus som signalkälla är mindre vanligt idag men har stor potential, särskilt när det gäller att uppnå stora djup.

Bilaga G: Georadar

INLEDNING

Principen för georadar är att en kort elektromagnetisk puls, radiovåg, sänds ner i marken. Pulsen reflekteras mot elektriska diskontinuiteter. Dessa kan utgöras av skillnader i elektrisk ledningsförmåga eller radiovågshastighet. Översatt till jordartsparmetrar är det kornstorleken och vattenhalten som utgör diskontinuiteter (Reynolds 2011; Annan 2005; Johansson et al. 1995).

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.

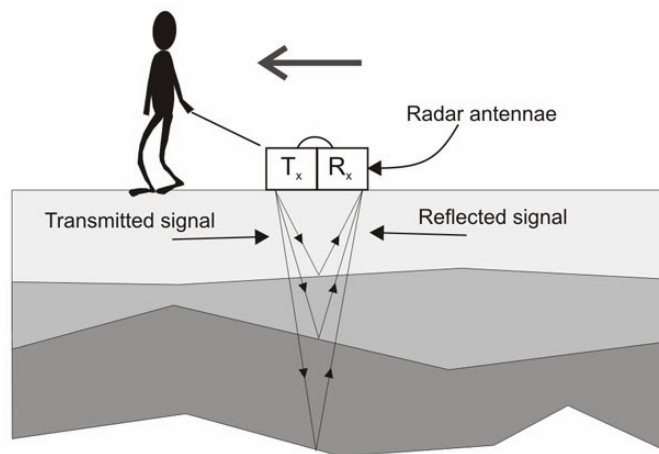
Upplösningen, dvs. förmågan att särskilja näraliggande objekt, blir bättre vid högre frekvens och om bandbredden ökas. Upplösning och penetration kan optimeras med antennbyte. Det finns georadarsystem med antenner vars centerfrekvenser ligger i området 10 - 2500 MHz. Upplösningen för de lågfrekventa är i storleksordningen tiotals meter medan de högfrekventa har en upplösning av ett par cm. Det finns idag kommersiella radarsystem som kombinerar två frekvenser i samma enhet, t.ex. 70 MHz plus 300 MHz och 170 MHz plus 600 MHz.

De flesta kommersiella radarsystem använder sig av korta pulser av monocykelkaraktär. 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. Det finns kommersiell utrustning som arbetar med frekvenssvep.

METODBESKRIVNING

Georadar för dammundersökningar utnyttjar antenner med frekvenser i området 25 - 500 MHz. Lägre frekvenser är lämpliga för att undersöka dammens struktur i stort, medan högre frekvenser lämpar sig för undersökning av tät kärnans läge relativt dammkrönet.

Man kan använda samma antenn som sändare och mottagare eller separera dessa funktioner (Figur G 1). Delar man på antennerna minskar reflexerna från ytnära objekt och djupare reflexer framträder klarare. Eftersom antennerna är små relativt våglängden är det svårt att fokusera den utsända pulsen i en riktning. Detta leder till att man kan få reflexer från objekt ovan mark, t.ex. byggnader, träd, belysningsstolpar, etc. Det finns skärmade antenner som ska fokusera signalen neråt, men det fungerar i många fall inte så bra och i synnerhet inte för låga frekvenser.



Figur G 1 Principskiss för georadar (<http://fpangoingpublic.blogspot.com/2014/01/gpr-testing-at-st-augustines-fountain.html>).

Antennerna kopplas traditionellt till en huvudenhet, vilken styr mätförloppet och även innehåller möjlighet att lagra mätdata. I den senaste generationen system sitter all elektronik för pulsgenerering och mätning med digitalisering inbyggd i antennen, och styrningen kan skötas via exempelvis en pekplatta eller bärbar dator som innehåller programvara med användargränssnitt för att styra mätprocessen och visualisering av data under mätningen. Kommunikationen mellan antennenhet och pekplatta / dator kan ske genom kabel eller trådlöst via trådlöst nätverk. Data kan överföras till den senare eller lagras i antennen.

Den senaste generationen georadarutrustning har bättre dynamisk upplösning än äldre system. Detta uppnås genom snabbare elektronik som gör att man kan medelvärdesbilda signalen över flera mätvärden och därigenom få tydligare registreringar. Detta leder till att man kan få bättre upplösning av strukturer i marken till större djup. Beroende på tillverkare har den nya tekniken olika namn, t.ex. RTS (real time sampling), HDR (high definition radar) eller HyperStacking.

Det finns möjlighet att styra datatagningen med konstant tidsintervall mellan mätpunkterna eller med hjälp av ett måthjul. Fördelen med detta är att man får data med konstant avstånd mellan mätpunkterna, oberoende av hastigheten. Moderna system innehåller normalt GNSS (global navigation satellite system) för positionering av antennen, och stödjer anslutning av extern differentiell GNSS.

Det finns flera olika flerantennsystem som kan hantera upp till 30 kanaler, som gör att mätningar snabbt kan utföras för att alstra tredimensionella data. Om antennerna arrangeras vinkelrätt mot dammkrönets riktning, kan man t.ex. bedöma tätjärnekrönets lutning relativt dammkrönet.

För att kunna bedöma djupläget för detekterade strukturer och avvikelser är uppskattning av radiovågshastigheten i det undersökta materialet nödvändig. Det kan ske genom identifiering av reflexer från kända objekt i dammkonstruktionen, genom jämförelse med borrhning eller provgrop eller genom speciella mätförloppen som medger beräkning av radiovågshastigheten. 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 betecknade 1,2,3. 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 gränsyta. Metoden lämpar sig i princip väl för kontinuerliga mätningar. Det har emellertid vid praktiska försök på jorrdammar med separata antenner visat sig omöjligt att få den noggrannhet i geometri som krävs för att man skall kunna göra beräkningar av tät kärnedjup på några meter.

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 reflektorerna bestämmas. Metoden förutsätter stillastående mätningar och kan således endast tillämpas punktvis.

Beräkningen av hastighet kan också ske om man har punktreflektorer i dammbyggnaden. En punktreflektor 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 jorrdamm.

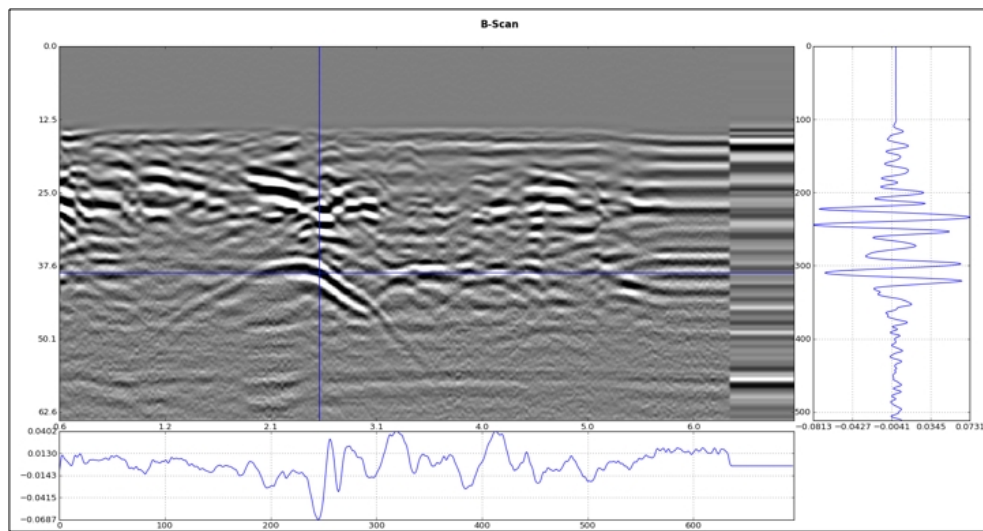
Radiovågorna tränger genom färskvatten och is varför man från en båt eller isytan kan utföra sedimentmäktighetsundersökningar uppströms dammbyggnaden. Man kan även tänka sig att mäta in i fyllningsdammen från vattnet eller isen strax uppströms.

Radarmätningar kan även utföras mellan borrhål, vilket presenteras i *Bilaga H*.

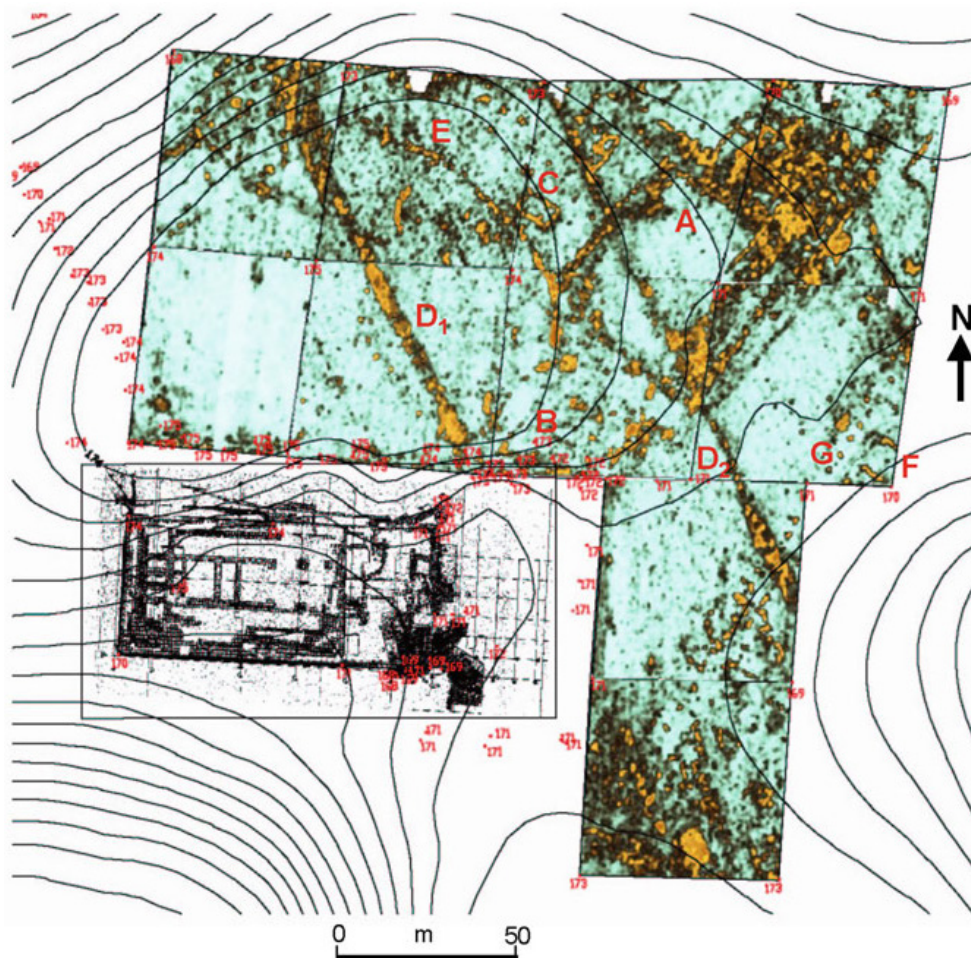
UTVÄRDERINGSMETODIK

Utvärdering av georadardata sker först genom att radargram ritas ut (Figur G 2). Dessa visar reflexernas styrka som funktion av tid (y-axeln) och läge (x-axeln). Diagrammet 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 jorrdammens uppbyggnad. Man kan också göra diagram som följer en viss reflex och ritar ut dess styrkevariationer i x-led.

Det finns rikliga möjligheter att signalbehandla och filtrera data för att göra radargrammen tydligare och mera lättolkade. Om man med någon av metoderna som nämnts ovan uppskattar radiovåghastigheten kan man göra sektioner som visar reflexernas styrka som funktion av djup (y-axeln) och läge (x-axeln). En komplikation i sammanhanget är att hastigheten ofta varierar både mot djupet och längs linjen, vilket försvårar att få fram en bra djupskala.



Figur G 2 Exempel på radargram, med en registrerad signal visad till höger och signalamplitudens variation på en tidsnivå visad nederst (http://www.earthsciencesystems.com/wp/?page_id=194)



Figur G 3 Exempel på tidsnitt från 3D georadarundersökning som visar läget för murrester i marken i anslutning till utgrävda rester av ett tempel (Cozzolino et al. 2018).

Om man mäter flera parallella linjer, antingen genom att använda ett multikanalsystem eller att mäta varje linje för sig, kan man presentera resultaten i form av tidsnitt där längre tid motsvarar större djup (Figur G 3). Det är ofta betydligt lättare att identifiera olika strukturer i marken på det sättet, oavsett om de är geologiskt betingade, om det avspeglar en konstruktion eller en skada på denna.

Georadarmetoden kan användas för repeterade mätningar, men kräver ett bra system för exakt positionering mellan mättillfällena för att få jämförbarhet mellan mättillfällena. Repeterade mätningar ger möjlighet att studera naturliga variationer i dammens elektromagnetiska signatur, och genom att beräkna differensbilder kan man se var förändringar ägt rum. När en viss erfarenhet samlats in kan man kvantifiera en avvikelse och på så vis bedöma om den fordrar omedelbara åtgärder eller om åtgärden kan vänta tills ett mer ekonomiskt tillfälle yppar sig. Under väntetiden kan man öka intensiteten av mätningarna så att förändringshastigheten hålls under kontroll. Skulle förändringen accelerera måste åtgärdstillfället förläggas tidigare.

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 vattenhalt 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 på grund av 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. Presentationstekniken för mätdata har utvecklats mycket på senare år, och det finns potential för ytterligare utveckling.

Bilaga H: Borrhålsmetoder

INLEDNING

Flera geofysiska metoder kan utföras i ett borrhål, mellan två eller fler borrhål eller mellan ett borrhål och markytan. Mätningar mellan borrhål med seismik eller radar kallas tomografi, och bygger på att man känner anståndet mellan sändare och mottagare och därigenom kan räkna ut hastigheten med vilken den seismiska respektive elektromagnetiska vågen breder ut sig (Reynolds 2011; Paillet & Ellefsen 2005).

Seismiska mätningar kan utföras med ett enstaka borrhål i form av vertikal seismisk profilering (VSP), med vars hjälp man kan bestämma de seismiska hastigheterna längs borrhålet. Man har då en eller flera sensorer i borrhålet och en eller flera skottpunkter på markytan (s.k. Walkaway-VSP), eller vice versa.

En undersökningsteknik som konceptuellt liknar seismisk borrhålstomografi är att mäta genom dammen, genom att placera signalkällan på nedströmssidan och geofonerna på uppströmssidan, eller vice versa, s.k. "through the dam seismics".

Genomgående för seismiken är att man kan använda både P-vågor och S-vågor, där det finns för och nackdelar med respektive vågtyp. P-vågor är lättare att generera, vilket gör utrustningen enklare att använda och billigare, men resultatet kan påverkas mycket av vattenhalten i materialet. Generering av S-vågor kräver specialutrustning som är mera komplicerad att använda, men ger mera robusta resultat även om vatteninnehållet varierar i tid och rum.

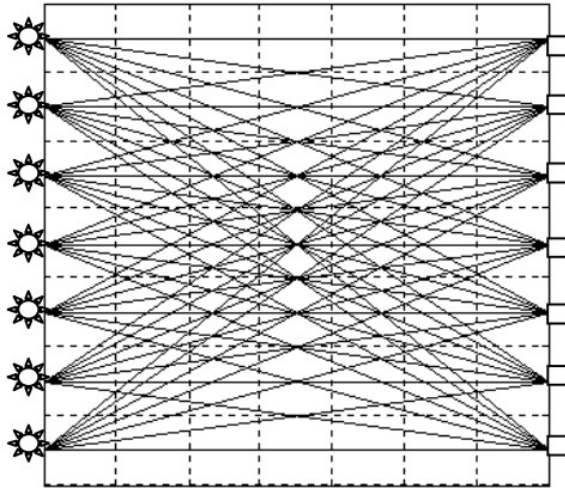
Borrhål kan även utnyttjas för geofysisk loggning, där man för ner mätprober som mäter olika fysikaliska parametrar med hög vertikal upplösning i ett borrhål. En del av dessa nämns under "Övriga metoder" i Kapitel 3. Geofysisk borrhålsloggning används mycket i samband med olje-gasprospektering och även i t.ex. grundvattentillämpningar.

Resistivitet och IP kan också utföras som tomografi i och mellan borrhål, men tas inte upp här eftersom utvärderingstekniken i princip är densamma som för dessa metoder i övrigt.

METODBESKRIVNING

Vid seismisk borrhålstomografi sänker man ner en signalkälla i ett borrhål medan det andra används till mottagare i form av geofoner eller hydrofoner. Man använder oftast en s.k. "sparker" som källa, som skickar ut en tryckpuls som genereras av tryckluft eller högspänning. Det finns även källor som skickar ut S-vågor, de bygger på att man klämmer fast källan mot borrhålsväggen genom att pumpa upp tryck i en manschett. Man kan använda hydrofoner som mottagare, och då endast ta emot P-vågor. Om man ska ta emot S-vågor krävs det mekanisk kontakt med borrhålsväggen, varför man liksom för källan måste ha en anordning som kan expandera och trycka sensorn mot borrhålsväggen.

Figur H 1 visar strålmönster vid mellanhålsmätningar vid homogena förhållanden, om hastigheten varierar inom den undersökta volymen kommer de seismiska vågorna böjas av, om det finns skiktgränser mellan olika hastigheter kan de refrakteras etc.



Figur H 1 Strålmönster vid mellanhålsmätningar vid homogena förhållande (Imhof et al. 2010).

Radarmätningar kan också utföras mellan borrhål, med en antenn som sänder ut signaler i ett borrhål och en antenn som tar emot signalerna i ett annat. Borrhålet får inte vara fodrat med metallrör, utan det måste vara foderrör av plast. Pulsens hastighet och amplitud påverkas när den passerar jorden mellan borrhålen. Pulsens styrka och ankomsttid utnyttjas för att räkna ut hur dämpning och hastighet varierar i det plan som ligger mellan borrhålen. 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, vilken i sin tur till största del är beroende på markens vattenhalt. Variationer i jordartstyp, densitet och temperatur påverkar endast marginellt (Topp et al. 1988). Dielektricitetskonstanten är emellertid frekvenberoende, och minskar för höga frekvenser. Detta medför att ledningsförmågan och därmed även dämpningen ökar för höga frekvenser, vilket leder till att räckvidden avtar. Borrhålsradar använder vanligtvis frekvenser lägre än 100 MHz, vilket är lågt i radarsammanhang.

Det är också möjligt att göra enkelhålsmätningar, med båda antennerna i samma borrhål. Resultatet kan dock bli svårtolkat p.g.a. att det inte går att avgöra från vilken riktning de reflekterade signalerna kommer.

VSP används för att bestämma gånghastigheten på olika djup längs ett borrhål genom att placera mottagare på olika nivåer i borrhålet och alstra seismiska pulser på marken. Ofta alstrar man pulser på olika avstånd från borrhålet, så kallad "walkaway" VSP undersökning. Det underlättar för tolkningen att ha många kombinationer av sändar- och mottagarpositioner, eftersom det kan bli svårt att

särskilja direktvågor från reflekterade och refrakterade vågor annars. Man kan också alstra pulser på olika nivåer i borrhålet och mäta med geofoner på markytan. Man kan använda på p-vågor och S-vågor vid VSP, beroende på typ av seismisk källa och mottagare, där S-vågor har fördelen att ge högre geometrisk upplösning som följd av att de har kortare våglängd.

”Through the dam seismics” har testats i full skala på dammar med sändare på uppströmssidan och mottagare på nedströmssidan, och vice versa, och då givit lovande resultat (Gaffran & Jefferies 2005). Utvärderingen av data kan göras på samma sätt som för borrhålstomografi, se nedan.

UTVÄRDERINGSMETODIK

Seismiska data kräver processering och omsorgsfull kvalitetskontroll, vilket inte beskrivs närmare här. Mellanhålmätningar kan redovisas i form av tomogram. För att framställa ett tomogram indelas planet mellan borrhålen i ett antal celler, för vilka de seismiska hastigheterna eller radarvågornas gånghastighet bestäms genom inversion. Därmed får man ett indirekt mått på materialets täthet eller styvhet, beroende på seismisk vågtyp, respektive dielektricitetskonstant i fallet radar. 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 materialegenskapens variation i planet mellan borrhålen, se exempel i Figur H 2.

Upplösningen mellan två närliggande objekt är ungefär lika med halva våglängden, men beror även på centrumavståndet mellan borrhålen. Den vertikala upplösningen försämras i sektionens mitt med ökande c-c avstånd p.g.a. minskande täthet av skärande strålar.

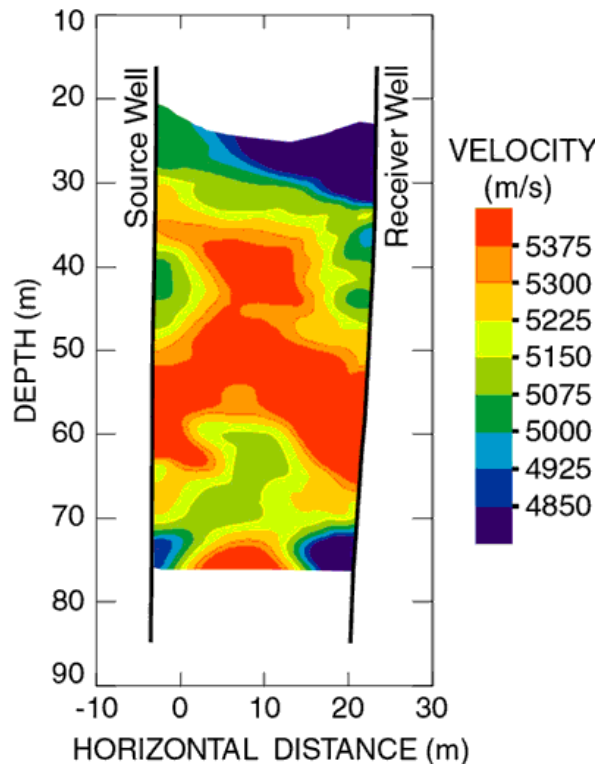
Enkelhålmätningar med radar kan redovisas i form av radargram, ur vilka reflektorernas läge och geometri kan uttolkas. En nackdel är att ingen information om i vilken riktning i horisontalled från borrhålet som reflektorn ligger fås.

POTENTIAL OCH BEGRÄNSNINGAR

Borrhålstomografi är beroende på att det finns borrhål att placera sändare och mottagare i. I fyllningsdammar är tillgången till lämpliga borrhål oftast begränsad, liksom intresset för att borra nya. En möjlighet kan vara borra uppströms och nedström tåtkärnan, i händelse av att andra metoder indikerar en avvikande zon som man önskar mera information om.

Med seismisk tomografi kan man identifiera zoner med avvikande täthet eller styvhet, beroende på vågtyp. Med borrhålsradar detekteras zoner med avvikande dielektricitetskonstant, vilket i princip innebär att materialet har avvikande vattenhalt. Vid undersökning av fyllningsdammar kan på så vis potentiella läckagezoner med förhöjd porositet och vattenhalt detekteras med mycket god noggrannhet och upplösning. Seismisk borrhålstomografi och borrhålsradar har använts på fyllningsdammar vid enstaka tillfällen i Sverige, men resultaten är med få undantag (Carlsten et al. 1995) inte offentliga. Kravet på borrhål med tillräckligt stor diameter gör att det är en ganska hög tröskel för att använda

borrhålstomografi för tillståndskontroll, i fallet borrhålsradar måste de dessutom vara plastklädda.



Figur H 2 Exempel på seismisk hastighetsbild baserad på borrhålstomografi (Ellefsen et al. 2002).

Borrhålstomografi har potential för övervakning genom repeterade mätningar, där dock exakt placering av sändare och mottagare i borrhålen är av största vikt. Om det kan visas att seismisk mätning med optisk fiber ger tillräckligt hög upplösning för tillämpningen skulle det kunna öppna nya möjligheter.

GEOFYSISKA METODER INOM DAMMSÄKERHETSOMRÅDET

Den här kunskapssammanställningen är ett avstamp inför en ny satsning på geofysiska metoder för att mäta inre erosion och öka dammsäkerheten.

För att upptäcka skador i dammar krävs att den metod som används kan mäta avvikelser i de parametrar som är betydelsefulla. Vid inre erosion är det framför allt läckageflöde, porositet och vattenmättnad som förändras.

Här har forskarna gått igenom geofysiska mätmetoder och gjort korta redogörelser för fysikalisk princip, praktiskt tillvägagångssätt, utvärderingsmetodik, möjligheter och begränsningar. För varje metod eller grupp av metoder har en kort bedömning utförts av lämpligheten för dammsäkerhetstillämpningar.

Resultaten visar att för att öka kunskapen kring att använda geofysiska metoder krävs utbildningssatsningar och seminarier. Det skulle också hjälpa att ha en branschgemensam dokumentation kring geofysikerfarenheter.

Ett nytt steg i energiforskningen

Energiforsk är en forsknings- och kunskapsorganisation som samlar stora delar av svensk forskning och utveckling om energi. Målet är att öka effektivitet och nyttiggörande av resultat inför framtida utmaningar inom energiområdet. Vi verkar inom ett antal forskningsområden, och tar fram kunskap om resurseffektiv energi i ett helhetsperspektiv – från källan, via omvandling och överföring till användning av energin. www.energiforsk.se



Energiforsk