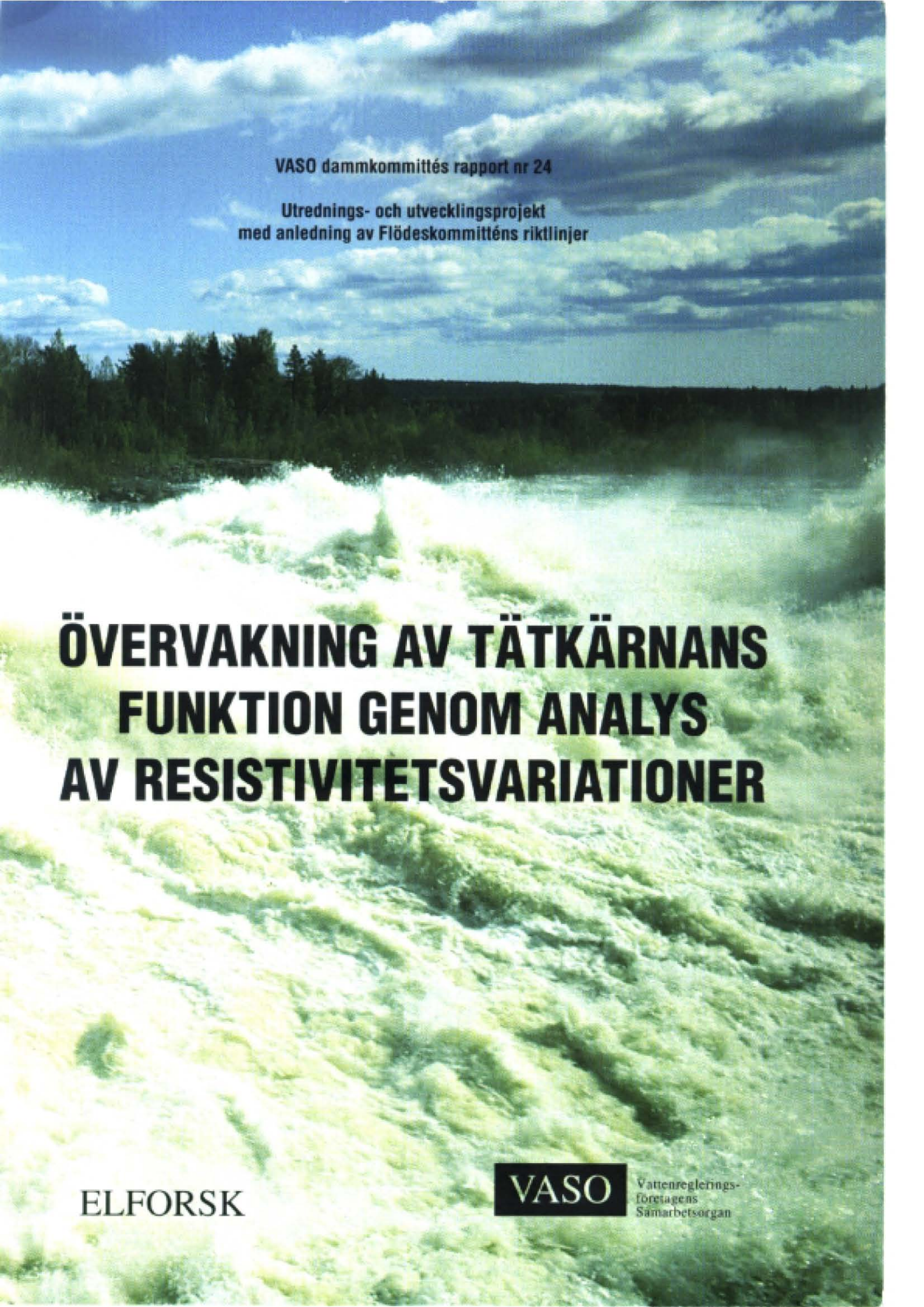




VASO dammkommittés rapport nr 24

Utrednings- och utvecklingsprojekt
med anledning av Flödeskommitténs riktlinjer

ÖVERVAKNING AV TÄTKÄRNANS FUNKTION GENOM ANALYS AV RESISTIVITETSvariationer

ELFORSK

VASO

Vattenreglerings-
företagens
Samarbetsorgan

VASO dammkommittés rapport nr 24

Utrednings- och utvecklingsprojekt
med anledning av Flödeskommitténs riktlinjer

ÖVERVAKNING AV TÄTKÄRNANS FUNKTION GENOM ANALYS AV RESISTIVITETSvariationer

Sam Johansson, HydroResearch
Thorleif Dahlin, LTH, Avd. för teknisk geologi

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

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

FÖRORD	i
SAMMANFATTNING	ii
SUMMARY	iii
1. INLEDNING	1
2. MÄTMETODIK	2
2.1. Resistivitet	2
2.1.1. Allmänt	2
2.1.2. Mätprincip	3
2.1.3. Pratiskt utförande	5
2.2. Självpotential	6
2.2.1. Allmänt	6
2.2.2. Mätprincip	6
2.2.3. Praktiskt utförande	6
3. METODIK FÖR DATABEARBETNING OCH TOLKNING	8
3.1. Resistivitet	8
3.1.1. Variation i mätdata	8
3.1.2. Numerisk modelltolkning	9
3.1.3. Variation i tolkade resultat	9
3.2. Självpotential	10
4. LÖVÖN – MÄTRESULTAT OCH KVALITATIV TOLKNING	11
4.1. Beskrivning av dammen	11
4.2. Konduktivitetsvariationer i magasinet	12
4.3. Resistivitetsmätningar i dammen	12
4.4. Resultat	13
4.5. Modelltolkning	13
4.6. Variationer i tolkade resultat	13
4.7. Självpotential (SP)	14
4.8. Erfarenheter	16
5. MOFORSEN – MÄTRESULTAT OCH KVALITATIV TOLKNING	17
5.1. Beskrivning av dammen	17
5.2. Konduktivitetsvariationer i magasinet	17
5.3. Resistivitetsmätningar i dammen	20
5.4. Variation i mätdata	20
5.5. Modelltolkning	21
5.6. Variationer i tolkade resultat	21
5.7. Självpotential	23
5.8. Erfarenheter	23
6. METODIK FÖR KVANTIFIERING AV VATTENSTRÖMNING	24
6.1 Grundläggande teori	24

6.2.	Utvärdering av fasförskjutning	25
6.3.	Utvärdering av amplitud	27
6.4.	Utvärdering av mätningar vid Lövön	29
6.6.	Utvärdering av mätningar vid Moforsen	30
7.	POTENTIAL OCH FORTSATTA ARBETEN	33
8.	SLUTSATSER	35
9.	REFERENSER	37

FÖRORD

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

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

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

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

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

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

Föreliggande projekt har genomförts av Sam Johansson, HydroResearch och Torleif Dahlin, LTH – avd. för Teknisk Geologi. I projektets styrgrupp har Harald Eriksson – Sydkraft, Bo Eriksson – Krångede, Arne Eriksson – Graningeverken, Carl-Axel Triumf – Triumf Geophysics AB samt Urban Norstedt och Malte Cederström – Vattenfall Vattenkraft ingått.

Metoder för övervakning av dammar är ett viktigt område och den tekniska utvecklingen har aktualiserat ett antal nya metoder.

Denna rapport beskriver ett pilotprojekt, där man vid ett par dammar studerat möjligheter att övervaka tåtkärnans funktion primärt genom mätning av resistivitet kontinuerligt längs dammen och temperatur i enstaka borrhål. Den teoretiska basen för projektet är den analys av hur läckaget påverkar temperaturvariationen i dammen, som blev resultatet av tidigare projekt, finansierade av VAST och Vattenfall. Som en första ansats har denna metodik utvecklats vidare och anpassats till att utvärdera läckagets storlek genom analys av resistivitetsvariationer. Resultatet av pilotprojektet verkar lovande.

VASO dammkommitté

SAMMANFATTNING

Internationella erfarenheter visar att det finns ett behov av att utveckla metoder och mätmetodik för att få en förbättrad övervakning av fyllningsdammar. Av speciellt intresse är dels metoder som tidigt kan registrera begynnande förändringar i dammen, dels metoder som möjliggör övervakning av hela dammen. Syftet med detta pilotprojekt är att registrera lokala strömningsförändringar genom mätning av resistiviteten.

Vattenströmningen genom en damm ger bland annat upphov till säsongsmässiga temperaturvariationer, vilket i sin tur påverkar resistiviteten i dammen. Den grundläggande hypotesen i detta projekt är därför att även den säsongsmässiga resistivitetsvariationen kan användas för att detektera förhöjt läckage. Genom att studera resistivitetsvariationen och vidareutveckla den tolkningsmetodik som utvecklats för temperaturmätningar kan vattenströmningen kvantifieras.

Resistiviteten mäts via elektroder som grävts ned i dammens krön eller på dess nedströmsida. Det använda mätsystemet är datorstyrt och består bland annat av mätinstrument, kopplingsenhet och flerledarkablar. Mätningar med ca två månaders mellanrum har utförts vid Lövöns och Moforsens kraftverk. Sammanlagt har åtta mätningar gjorts vid Lövön och sex vid Moforsen. Vid Lövön har mätningar enbart utförts från dammkrönet medan det vid Moforsen har utförts mätningar från dammkrönet samt från de två terrasserna nedströms, dvs längs sammanlagt tre mätlinjer.

En första tolkning av resistivetsdata har utförts med syfte att upptäcka felaktiga mätresultat etc. Därefter har resultatet använts som indata för en kvantitativ tolkning av resistiviteten i dammen. De utvärderade resistiviteter i dammen visar en säsongsvariation på samma sätt som temperaturmätningar. Resultatet kan utvärderas genom att studera såväl pulsens fasförskjutning som dess amplituddämpning. Oberoende utvärdering kan därför göras med dessa båda utvärderingsmetoder vilket möjliggör viss kontroll av resultatet.

Den utvärderade vattenströmningen har jämförts med den som erhållits baserat på analys av temperaturmätningar, vilka inom mätområdet utförs i ett måtrör i Lövön och tre i Moforsen. Båda mätmetoderna visar flöden av ca 0,5–1 ml/s/m². Några känslighetsanalyser av de olika utvärderingsstegen har ej utförts för resistivitetsmätningarna, varför resultatens precision ej kan bedömas. Dessutom kan både mät- och utvärderingstekniken vidareutvecklas.

Genom tolkning av uppmätta resistivetsdata kan skillnader i vattenströmning lokaliseras och till viss del även kvantifieras. Med nuvarande teknik är metoden mest tillämplig för vanliga svenska dammar, dvs med en höjd lägre än ca 30 m och ca 500–1 000 m längd. Vid korta och höga dammar (exempelvis kortare än 200 m och högre än 50 m) blir både mätningarna och tolkningen mer komplicerad. Om man önskar använda metoden även för sådana dammar erfordras ytterligare utveckling och anpassning av metoden.

Resultatet från detta pilotprojekt synes vara lovande och metodens låga detektionsgräns innebär att eventuell inre erosion bör kunna upptäckas i ett tidigt skede. Genom att metoden är icke förstörande kan även förloppets utveckling i tiden följas.

SUMMARY

International experience has shown that there is a need of developing methods and methodology for seepage monitoring in embankment dams, which is the background and motive for this project. Of particular interest are methods able to register small seepage changes in the dam, i.e. in an early stage before internal erosion starts to affect the security of the dam.

Since temperature affects the resistivity, the basic hypothesis of this project is that the seasonal resistivity variation, as well as the temperature variation, can be used for detecting increased seepage. The aim is also to attempt to quantify the water flow by studying the resistivity variation and further develop the interpretation methodology developed for temperature measurements.

The data acquisition system used is computer controlled and includes a resistivity meter, a switch box and multi-core cables. In this application measurements are carried out by using permanently installed electrodes, which each time are connected to the multi-core cables. The electrodes consist of stainless steel plates buried in shallow pits which were back-filled with fine-grained material. Only a cable end is visible at each electrode after the back-fill.

Resistivity measurements were carried out in the embankment dams at Lövön and Moforsen with approximately two months interval. In total, eight measurements were carried out at Lövön and six at Moforsen. Wenner configuration was used both at Lövön and Moforsen. In addition, pole-pole configuration was used at Moforsen to increase the depth penetration on the relatively short dam.

Qualitative interpretation of resistivity data was made by plotting data in pseudosections. Quantitative interpretation was carried out by using two-dimensional numerical inversion, where the software automatically adjusts the interpreted model resistivities to fit the field data.

The quantitative interpretation of water flow through the dam is based on the fact that a variation in resistivity in the reservoir water will propagate into the dam with the seepage water. The variation due to variations in ion content will travel with pore velocity, whereas the variation due to temperature will move with the thermal velocity. The time variation in the resistivity in the dam can be monitored by means of repeated resistivity measurements.

The simplest way of evaluating consists of comparing extreme values for the absolute resistivity in the reservoir and the interpreted resistivity in the embankment dam. The diagrams are used to calculate phase shifts for the highest and lowest values.

Evaluation of the amplitude can be made on the assumption that observed resistivity variations in the embankment dam emanates from the temperature variation in the reservoir. The attenuation thus arising can be attributed primarily to heat conduction perpendicular to the flow direction. An independent evaluation can thus be made with the two methods, which allows some control of the result.

The measurements from Lövön show a significant variation along the profile. The Wenner measurements gave very stable results. Comparisons with temperature measurements were made in one section in a standpipe located in the filter downstream. Evaluation of the resistivity data according to the amplitude method gave approximately the same result as the phase shift method. However, the temperature measurements gave a higher flow concentrated to a smaller zone, whereas the results correlate better at depth. The differences are reasonable considering the higher vertical resolution of the temperature data compared to the resistivity data.

The resistivity measurements at Moforsen were carried out along three lines: along the dam crest and the two terraces. The variation in measured data is smaller than for Lövön, but the interpretation resulted in significant variations with time. The pole-pole configuration gives a larger depth penetration than Wenner, but poorer vertical resolution. In addition, pole-pole data is more susceptible to noise, due to the long reference cables.

At Moforsen temperature measurements were carried out in three standpipes, where the result can be used for comparison between the methods. Evaluation of the resistivity measurements gave results in rather good accordance with the temperature measurements.

SP-measurements at Lövön gave stable results, with a small variation. However, at Moforsen the SP-result is considered unreliable.

In conclusion, the water seepage can be detected and to some extent quantified by the interpretation of resistivity data. The method can be further improved in all parts of the system, as in installations, resistivity interpretation, seepage evaluation and presentation of results. By using new numerical models, the influence of 3D-effects and other various sources of disturbance can also be assessed.

At present the method is most suitable for longer dams. Both measurement and interpretation are more complicated for short and high dams, and a different methodology needs to be used. Thus there is a need for further development for such dams. The potentially low detection levels mean a possibility of detecting internal erosion at an early stage. Since the method is non-destructive the development in time can also be monitored.

1. INLEDNING

Internationella erfarenheter (ICOLD 1983 och 1995) visar att det finns ett behov av att utveckla metoder och mätmetodik för flödesmätning i fyllningsdammar, vilka kan användas för att upptäcka inre erosion. För att uppnå detta är önskvärt att få fram metoder som kan registrera små förändringar i dammen, dvs sådana som i ett tidigt skede kan registrera förändringar. Detta är bakgrunden och motivet för detta projekt. Att fyllningsdammar behöver övervakas är en självklarhet, men graden av övervakning varierar dock från damm till damm beroende på dammens läge, magasinvolym uppbyggnad etc. Ofta förändras undersökningsbehovet med tiden eftersom dammen åldras och egenskaperna därmed förändras. Detta kan medföra en ökad risk för uppkomst av exempelvis inre erosion.

Arbete med metodutveckling har bland annat genomförts i Tyskland, se t ex Merkler et al (1989). De metoder som där har undersökts är bland annat temperaturmätningar (termografi), självpotential och resistivitet. Mätmetodiken har anpassats till tyska förhållanden (mestadels låga och långa dammar) och har främst använts för läcksökning och i mindre utsträckning för kontinuerlig övervakning.

På uppdrag av VASO dammkommitté har befintliga och nya undersökningsmetoder studerats för svenska förhållanden, jfr Nilsson (1995) och Johansson et al (1995) vilka ingår i denna rapportserie. Dessutom finns ett projekt rörande automatisk övervakning av tät kärnan, Triumf et al (1995) i vilket mätning utförts av självpotential och resistivitet.

Temperaturmätningar i dammar har visat sig ge värdefull information om vattenströmningen genom dammen, jfr Johansson (1990, 1991). Metodik för lokalisering och kvantifiering har tagits fram och metoden används nu i ca femton dammar i Sverige, Canada och Frankrike. Eftersom temperaturen påverkar resistiviteten är den grundläggande hypotesen i detta projekt att även den säsongsmässiga resistivitetsvariationen kan användas för att detektera förhöjt läckage. Genom att studera resistivitetsvariationen och vidareutveckla den tolkningsmetodik som utvecklats för temperaturmätningar, är målet att även kunna kvantifiera vattenströmningen.

Projektets syfte är att:

- teoretiskt visa kopplingen mellan temperatur- och resistivitetsvariationen i dammarna.
- studera inverkan av övriga parametrar som kan påverka mätningarna, främst konduktivitetsvariationerna i magasinet.
- genomföra fältmätningar för att bedöma metodens noggrannhet och upplösning.

Projektets arbete har successivt redovisats för en styrgrupp bestående av Harald Eriksson – Båkab, Bo Eriksson – Krångede, Arne Eriksson – Graningevarken, Malte Cederström och Urban Norstedt – Vattenfall Vattenkraft, samt Carl-Axel Triumf – Triumf Geophysics.

En del av fältmätningarna har utförts inom ramen för ett examensarbete vid Lunds Tekniska Högskola, och delar av materialet som presenteras i denna rapport är redovisat av Skoog och Nilsson (1995).

2. MÄTMETODIK

2.1. Resistivitet

Resistivitetsmätning har utförts vid Lövöns och Moforsens kraftverk med ca två månaders mellanrum med början 1993-11-17 på Lövön och 1994-06-01 på Moforsen. Detta ger sammanlagt åtta mättillfällen vid Lövön och sex vid Moforsen.

2.1.1. Allmänt

Vissa malmmineral har metallisk ledningsförmåga, annars är de vanligt förekommande jord- och bergartsbildande mineralen i praktiken isolatorer. Resistiviteten hos vanliga jord- och bergmaterial beror därför av vatteninnehållet: mängden vatten, joninnehållet i vattnet samt hur vattnet är fördelat i materialet. Viktiga tillämpningar för metoden finns inom grundvattenprospektering, grundvattenkvalitetsundersökning, och kartering av jord- och bergarters utbredning för råvarukartläggning och geotekniska ändamål. Metoden beskrivs utförligare av till exempel Parasnis (1986) och Dahlin (1993) och Johansson et al. (1995).

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

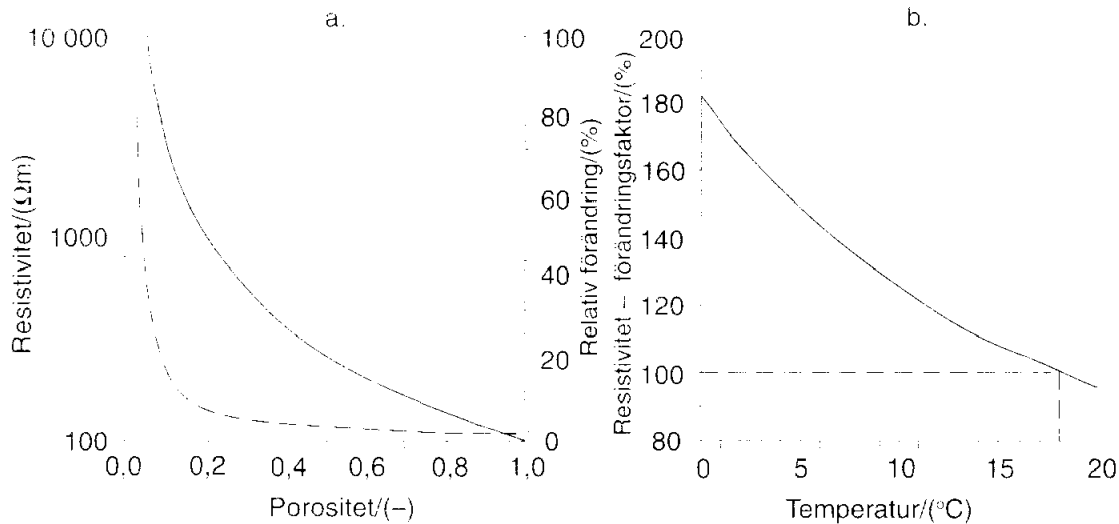
$$\rho_i = \rho_w a n^m \quad (\text{ekv 2.1})$$

där ρ_i = formationens resistivitet, ρ_w = vattnets resistivitet, n = porositet, medan a och m är materialberoende konstanter. Om parametern m för ocementerat sedimentär sandsten väljs ($m = 1,4$) kan detta ge en uppskattning som är relevant för lerfritt jordmaterial. Diagrammet i figur 2.1.a visar hur resistiviteten varierar med porositeten enligt Archies lag, med $m = 1,4$ och $a = 1$, samt hur stor förändring i resistivitet en procents förändring av porositeten ger upphov till vid olika porositeter. Vid 30% porositet ger en höjning eller sänkning av porositeten med en procentenhet upphov till en resistivitetsförändring på cirka 5%. Effekten ökar med sjunkande porositet, och vid 10% porositet blir motsvarande resistivitetsförändring 9%.

Resistiviteten är vidare beroende av temperaturen, vilket framgår av diagrammet i figur 2.1.b. Resistiviteten ökar med sjunkande temperatur beroende på minskad mobilitet hos jonerna i vattnet då viskositeten ökar. Vid tjäle ökar resistiviteten kraftigt. Ofta behöver man ej ta hänsyn till temperaturvariationer vid resistivitetsundersökningar. I fallet med jorddammar är dock den säsongsmässiga temperaturvariationen i dammen så stor att det ej kan försummas utan vidare.

Som framgår av (ekv 2.1) är resistiviteten direkt proportionell av joninnehållet i vattnet. Vid flertalet resistivitetsmätningar antas joninnehållet vara konstant i tiden, men detta är korrekt vid mätning på fyllningsdammar.

Med effektiv resistivitet avses här verklig resistivitet utan korrektion för temperaturens inverkan.



Figur 2.1. a. Resistivitetens beroende av porositeten i lerfritt material enligt Archies lag ($\rho_s = 100 \Omega m$, $a = 1,0$, $m = 1,4$).
 b. Resistivitetens beroende av temperaturen (temperaturkoefficienten $\alpha = 0,025$).

2.1.2. Mätprincip

Mätningarna utförs genom att en kontrollerad ström sänds mellan två elektroder som placerats i marken. Samtidigt mäts potentialfallet mellan två andra elektroder (figur 2.2). Ofta används elektroder av rostfritt stål för såväl ström- som potentialelektroder. För mätningarna används normalt en fyrkantvåg, dvs en likström med omväxlande polaritet. Genom att ta medelvärde av mätningar med omvänd polaritet minimerar man störningar från exempelvis självpotentialer. Mätningen ger ett mått på resistansen:

$$R = U/I \quad (\text{ekv 2.2})$$

med enheten ohm (Ω). U betecknar här spänning och I strömstyrka. Enligt reciprocitets-teoremet kan man kasta om positionerna för ström- och potentialelektroder med oförändrat resultat, vilket kan användas för att bestämma mätfelens storlek.

För att resultatet skall kunna tolkas måste de uppmätta resistanserna räknas om till materialparametern resistivitet (ρ), med enheten ohmmeter (Ωm), vilken är oberoende av provvolymens storlek. Resistiviteten beräknas med hjälp av en formel, som tar hänsyn till hur elektroderna placerats geometriskt:

$$\rho_a = 2\pi a R \quad (\text{ekv 2.3})$$

där a är det aktuella elektrodavståndet. Denna formel gäller endast för Wenner- och pol-polkonfiguration.

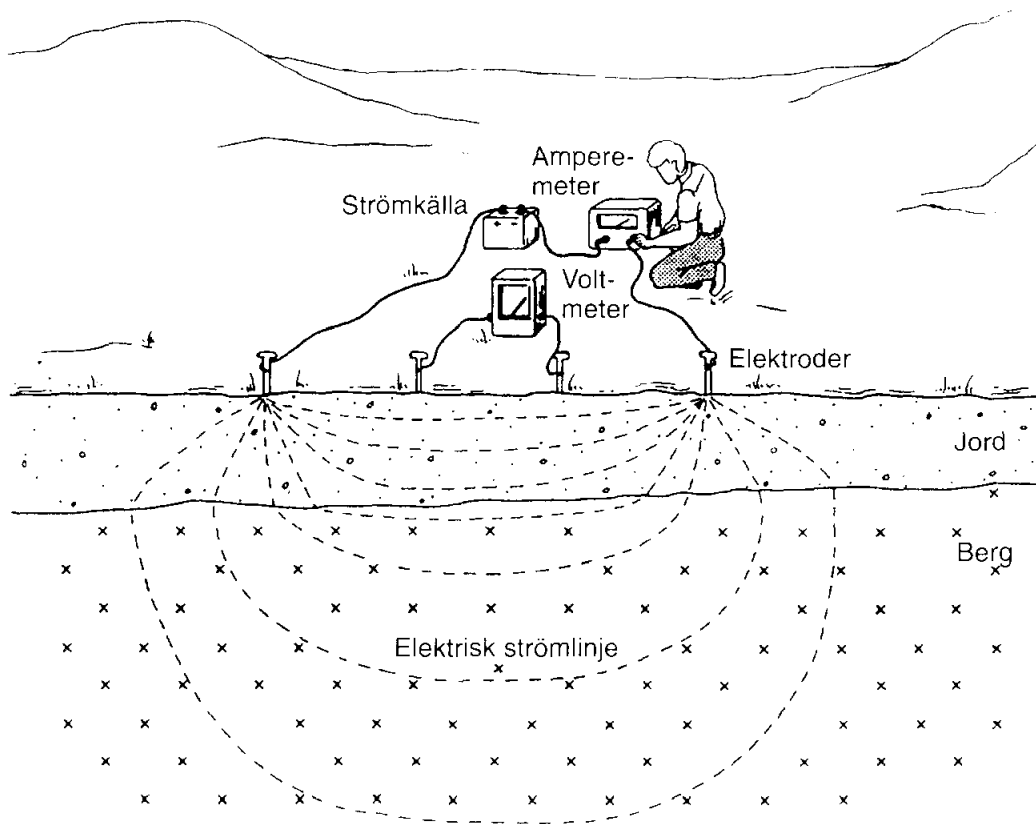
Det beräknade värdet benämns skenbar resistivitet (ρ_a), beroende på att resultatet avspeglar den kombinerade effekten av alla ingående enheter inom de aktuella markvolymen. Genom att variera elektrodavstånden kan djupnedträngningen varieras.

Den verkliga resistivitetsfördelningen i marken kan uppskattas med hjälp av invers modelltolkning, normalt genom att en diskret modell anpassas iterativt mot uppmätta data. Det har tills ganska nyligen varit nödvändigt att göra mycket förenklade antaganden om markens uppbyggnad, exempelvis att resistiviteten endast varierar mot djupet, men det pågår en stark utveckling på detta område.

Resistivitet är inversen av elektrisk konduktivitet, dvs:

$$\rho = \frac{1}{\sigma} \quad (\text{ekv 2.4})$$

Elektrodena kan placeras ut enligt många olika principer. Två mätupställningar har använts i detta projekt, Wenner och pol-pol. Wennermätning har använts vid både Lövön och Moforsen. Vid Moforsen har även pol-polmätning utförts för att erhålla bättre djupnedträngning på den relativt korta dammen.

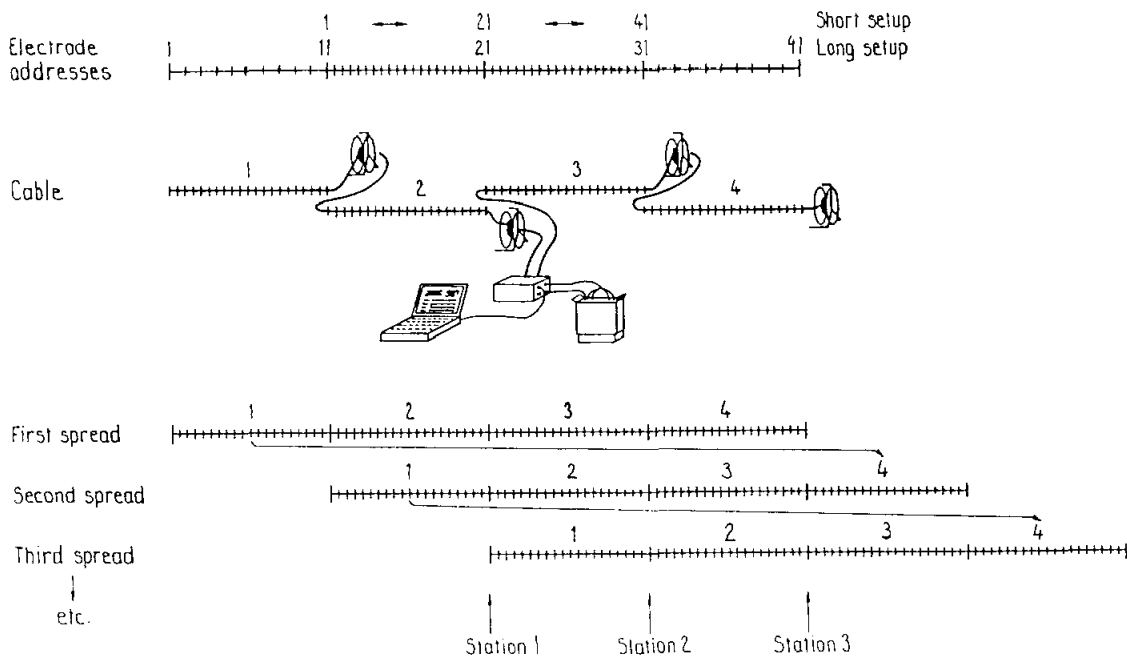


Figur 2.2. Princip för elektrisk resistivitmätning (modifierad från Robinson och Coruh, 1988).

Vid Wennermätning placeras elektrodena på en linje med strömelektrodena ytterst, och potentialelektrodena symmetriskt placerade kring mittpunkten, som i figur 2.2. Pol-polmätning innebär att endast en ström- och en potentialelektrod är aktiv inne i systemet, och att de övriga är placerade på så stort avstånd att det teoretiskt kan anses som i oändligheten. Resistivitetsundersökningarna har utförts som kombinerad profilering-sondering, även kallat CVES (Continuous Vertical Electrical Sounding), med hjälp av ett datorstyrt mätsystem.

2.1.3. Praktiskt utförande

Det använda mätsystemet är en prototyp utvecklad vid Lunds Tekniska Högskola (Dahlin, 1993), bestående av en ABEM Terrameter SAS300C, reläomkopplingsenhet med 4x64 kanaler, flerledarkablar samt diverse anslutningskopplingar (figur 2.3). Vidare har en extra strömförstärkare typ ABEM Booster SAS2000 använts för att förbättra datakvaliteten. Mätsystemet har nu vidareutvecklats i samarbete med ABEM Instrument AB och finns kommersiellt tillgängligt som Lund Imaging System. Vid det senaste mättillfället användas det nya utförandet av reläomkopplingsenheten som heter ABEM Electrode Selector ES464. Programvaran ERIC (Electrical Resistivity Imaging Control) som används för datainsamlingen är utvecklad vid Lunds Tekniska Högskola.



Figur 2.3. Principskiss över det använda mätsystemet (modifierad från Overmeeren och Ritsema (1988)).

Mätningarna sker med fast installerade elektroder, som kopplas till flerledarkablarna vid varje mättillfälle. Vid de första mättillfällena användes standardelektroder tillverkade av rundstav av syrafast stål. För att förbättra kontakten grävdes 1/2 meter djupa gropar som återfylldes med finkornigare material, med bättre vattenhållande förmåga, i vilka elektroderna drevs ned. Dock visade det sig vara svårt att få tag i riktigt finkornigt material i trakten, och det finaste materialet består av huvudsakligen mo (grov silt- fin sand). Stavelektroderna ger en total kontaktyta på:

$$a = \pi \cdot \Phi \cdot l = \pi \cdot 0.01 \text{ m} \cdot 0.5 \text{ m} = 0.016 \text{ m}^2$$

Detta visade sig ge otillräcklig kontakt med marken, vilken också tenderade att försämrats genom att elektroden, som bankats ned i jord som packats så gott det gick, efter en tid satt löst i marken. Därför byttes elektroderna ut mot plåtar i syrafast stål (storlek 25 cm · 25 cm) som lades i botten på groparna innan dessa återigen återfylldes med finkornigare material.

Efter återfyllningen sticker endast en sladdända med banankontakt upp ur marken vid varje elektrod. Platelektroderna ger en aktiv kontaktyta på:

$$a = 2 \cdot b \cdot l = 2 \cdot 0,25 \text{ m} \cdot 0,25 \text{ m} = 0,125 \text{ m}^2$$

dvs cirka 8 gånger större yta. Dessa elektroder gör det möjligt att sända ut större ström (oftast 50 mA vid 400 V utspänning) vilket ger bättre signal-brusförhållande och därmed bättre datakvalitet.

2.2. Självpotential

Självpotentialmätningar har utförts vid båda kraftverken. Vid Lövön har mätningar utförts vid två tillfällen medan endast en mätning gjorts vid Moforsen.

2.2.1. Allmänt

Självpotentialmetoden (SP) kan användas för detektering av flöden av vätska, värme och joner i marken, eftersom sådana flöden ger upphov till förändringar i de elektriska potentialerna i marken. Mätförfarandet är relativt snabbt varför metoden ofta torde vara kostnadseffektiv. För en utförligare beskrivning hänvisas till Johansson et al (1993) eller Triumph et al (1995).

2.2.2. Mätprincip

Principen för SP-undersökningar är enkel: man mäter spänningen mellan två elektroder med hjälp av en voltmeter. Vid mätningarna användes i detta fallet totalfältstekniken vilket 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 mätinstrumentet. Totalfältsmätningar är normalt att föredra med tanke på signal/ brusförhållandet. Det är möjligt att mäta SP-variationer i vattnet på uppströmssidan av en damm, vilket gör att man kan mäta kontinuerligt utan problem med markkontakt.

2.2.3. Praktiskt utförande

För att uppnå god datakvalitet användes så kallat icke-polariserbara elektroder, vilka består av en metallektrod nedsänkt i en lösning av salt av metallen (koppar-kopparsulfat vid första tillfället, bly-blyklorid vid andra tillfället). I bly-blykloridelektroderna har gips som är mättad med elektrolyt gjutits i utrymmet kring metallektroden, enligt en konstruktion presenterad av Petiau och Dupis (1980). Som mätinstrument användes en ABEM Terra-meter SAS300.

Det finns många källor till brus som kan störa resultaten från SP-mätningar, exempelvis naturliga variationer i potentialnivåerna till följd av telluriska strömmar. Resultaten blir därmed svårtolkade vilket medför risk för feltolkningar. Detta gäller särskilt vid enstaka mätningar. Vid det senare mättillfället registrerades därför variationerna i bakgrunds nivå

mellan fasta elektroder samtidigt som mätningen pågick. Det ovan beskrivna datorstyrda mätsystemet för resistivitet användes för automatisk bakgrundsivåmätning, med hjälp av en speciellt anpassad programvara. Som elektroder användes samma typ av icke-polariserbara elektroder som beskrivits ovan.

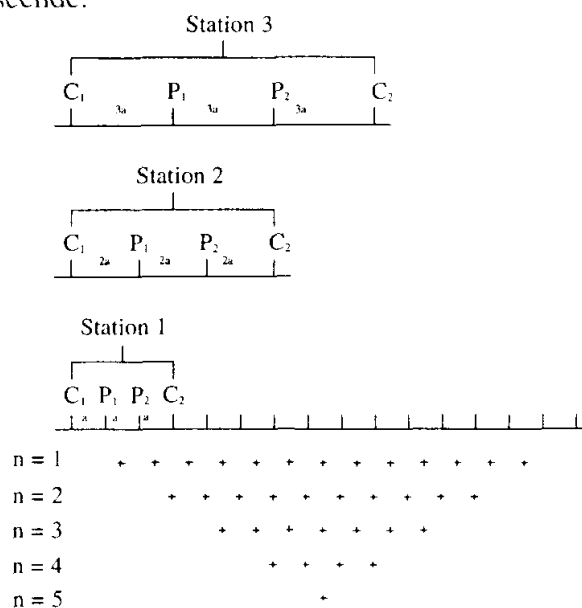
3. METODIK FÖR DATABEARBETNING OCH TOLKNING

3.1. Resistivitet

3.1.1. Variation i mätdata

Tolkning av resistivitetsdata har skett kvalitativt genom att data ritats upp i pseudosektioner. I en pseudosektion kan man identifiera zoner med avvikande resistivitetsegenskaper, vilket kan indikera områden som behöver följas upp med andra metoder. Pseudosektionerna har även använts för kontroll av datakvaliteten.

En pseudosektion är uppbyggd genom att de uppmätta skenbara resistiviteter ritas upp som en funktion av avstånd längs profilen och elektroavstånd (figur 3.1). Mittpunkten för varje elektrodkombination används för avståndet längs profilen och avståndet mellan elektroderna används som pseudodjupskala. Djupskalan i en pseudosektion är alltså ej verkligt djup och vidare kan variationer längs profilen ge kraftiga så kallade laterala effekter på pseudosektionens utseende.



Figur 3.1. Princip för upprättning av pseudosektion (efter Barker 1992).

För varje punkt i pseudosektionerna har medelvärde, variationskoefficient och normerad variation av de skenbara resistiviteter beräknats, vilka var för sig kan ritas upp som pseudosektioner. Variationskoefficienten är standardavvikelsen normerad mot medelvärdet:

$$v_{koeff} = \frac{s}{\rho_{medel, damm}} \quad (\text{ekv 3.1})$$

där s = standardavvikelsen.

Den normerade variationen har beräknats som:

$$v_{norm} = \frac{\rho_{max, damm} - \rho_{min, damm}}{\rho_{medel, damm}} \bigg/ \frac{\rho_{max, magasin} - \rho_{min, magasin}}{\rho_{medel, magasin}} \quad (\text{ekv 3.2})$$

3.1.2. Numerisk modelltolkning

Kvantitativ tolkning av resistivitetsdata har skett med hjälp av ett program som tar hänsyn till tvådimensionella variationer (2D-tolkning). Det anpassar automatiskt resistiviteter i cellerna i en finita differensmodell (FD). Programmet anpassar modellresistiviteter till att ge så god överensstämmelse som möjligt mellan beräknad modellrespons och uppmätta data enligt en princip som beskrivits av Loke och Barker (1994). Detta tolkningsprogram är anpassat för såväl Wennerkonfigurationen som pol-pol.

Den numeriska modelltolkningen är gjord med mjukhetsband på tolkningen som skall förhindra överdrivna och instabila tolkningar till följd av exempelvis brus i data. Dessa band kan varieras, där bland annat datakvaliteten styr vad som är lämpligt i det enskilda fallet. Tolkningen sker med så kallad 2.5D modellering, där de undersökta strukturerna kan variera längs profilen men förutsätts vara konstanta vinkelrätt mot profilriktningen (2D). Tolkningen tar hänsyn till att källtermerna (strömelektroder) är tredimensionella (punktelektroder), vilket kan kallas 2.5D tolkning.

Till följd av att inversion med mjukhetsband använts måste man räkna med att tolkade skillnader i resistivitet ej blir så stora som de är i verkligheten, dvs en lågresistiv zon torde i verkligheten ha något lägre resistivitet än vad tolkningen visar. Numeriska modeller fungerar i allmänhet bra för små kontraster i resistivitet, men man kan förvänta sig numeriska svårigheter för stora resistivitetskontraster. Vidare visar tolkningen alltid gradvisa övergångar mellan olika zoner, även om verkligheten har distinkta gränser. Detta bygger på ekvivalensprincipen som är en osäkerhetsfaktor i tolkningen av resistivitetsdata.

Ekvivalensprincipen innebär att olika resistivitetsfördelningar kan ge upphov till mätresultat som ligger så nära varandra att de är omöjliga att skilja från varandra i praktiken, eftersom mätdata är behäftade med osäkerheter och ofullständigheter. Denna osäkerhet kan minskas genom att förbättra datakvaliteten och datatäckningen, men ej elimineras. En annan möjlighet är att kombinera resistivitetsdata med information från andra metoder. Vikten av goda referensdata för tolkningen kan därför inte överskattas.

I fallet med fyllningsdammar som är aktuellt här vore det önskvärt att ta hänsyn till variationen i egenskaper tvärs dammen, såväl som längs dammen. Detta skulle dock kräva betydligt mera omfattande fältmätningar som underlag, förutom tillgång till 3D-tolkningsrutiner. Sådana datorprogram saknades vid detta arbetets genomförande. Det är emellertid viktigt att inse den förenkling av verkligheten som 2D-antagandet utgör.

3.1.3. Variation i tolkade resultat

Förändringar av resistiviteten i tiden har studerats genom att beräkna medelvärden och skillnader i tolkade resistivitet, på samma sätt som beskrivits för mätdata ovan. Dessa parametrar har ritats upp som djupsektioner av medelresistivitet och variation.

Icke flödesberoende variationer av resistiviteten i fyllningsdammar torde kunna hänföras främst till förändringar i markvattenhalt, porositet och vattennivå i magasinet. På basis av de temperaturmätningar som utförts i olika dammar kan konstateras att tjälen, liksom temperaturens årstidsvariation, kan inverka på resistiviteten ned till cirka 10 meters djup.

Under denna nivå kan dess påverkan försummas, såvida inte nedströmsfyllningen består av kraftiga block. Vattennivåförändringarna för de aktuella kraftverken är små. I den vattenmättade delen av tät kärnan bedöms någon säsongsmässig variation av porositet och markvattenhalt ej förekomma. Den säsongsmässiga variationen som uppmäts i dammarna beror därför till största delen på den flödesrelaterade variation av resistiviteten, som uppkommer genom vattenströmningen genom dammen, jfr vidare kapitel 6.

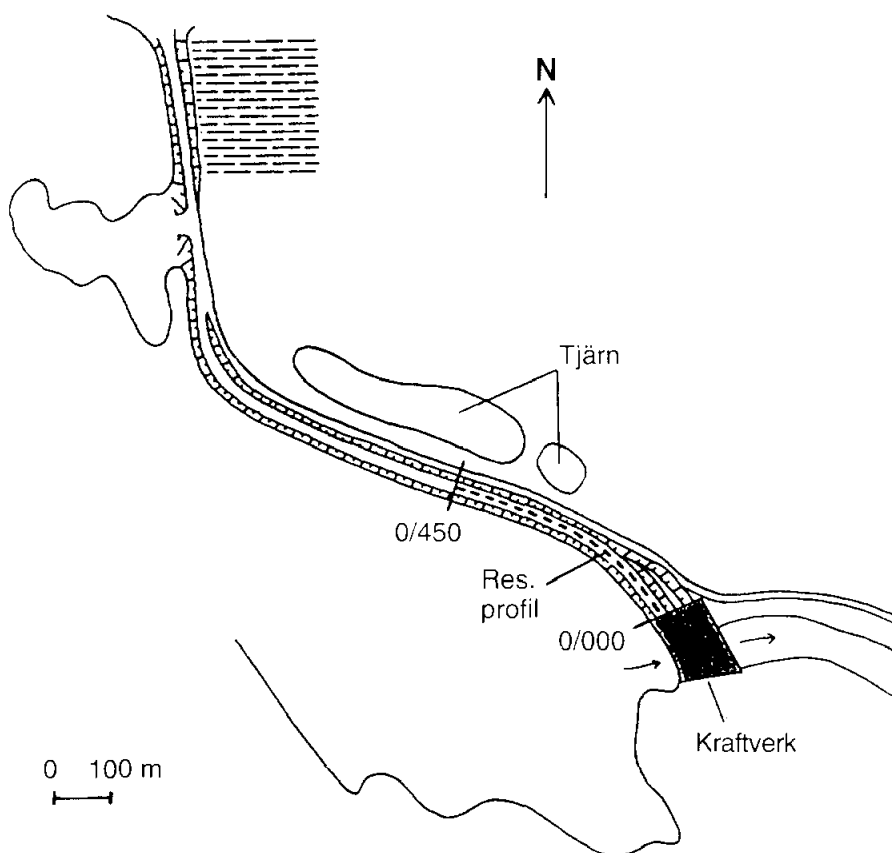
3.2. Självpotential

Tolkning av resultaten sker oftast kvalitativt genom att resultaten ritas upp i diagram och ekvipotentialkartor. Normalt får man negativa anomalier (relativa avvikelser som ej nödvändigtvis behöver ha negativt tecken) i områden vid inströmning i exempelvis en dammkonstruktion och positiva anomalier över utströmningsområden på nedströmssidan. Det finns ett samband mellan grundvattenflödets storlek och SP-anomaliens storlek, varför en ökning av SP-anomaliens storlek i tiden kan tjäna som indikation på ökande vattenströmning.

4. LÖVÖN – MÄTRESULTAT OCH KVALITATIV TOLKNING

4.1. Beskrivning av dammen

Lövöns kraftverk är beläget i Faxälven vid utloppet av Ströms Vattudal ca 10 km söder om Strömsund. Dammen är ca 1 500 m lång och löper parallellt med älven, se figur 4.1. Dammkrönet är beläget på nivån +289,5 vilket är 2,5 m ovanför magasinets dämningssgräns. Regleringshöjden är 3 m. mellan nivåerna +287 och +284 m.



Figur 4.1. Lövöns kraftverk: skiss över jorddammen och resistivitetsprofilens läge.

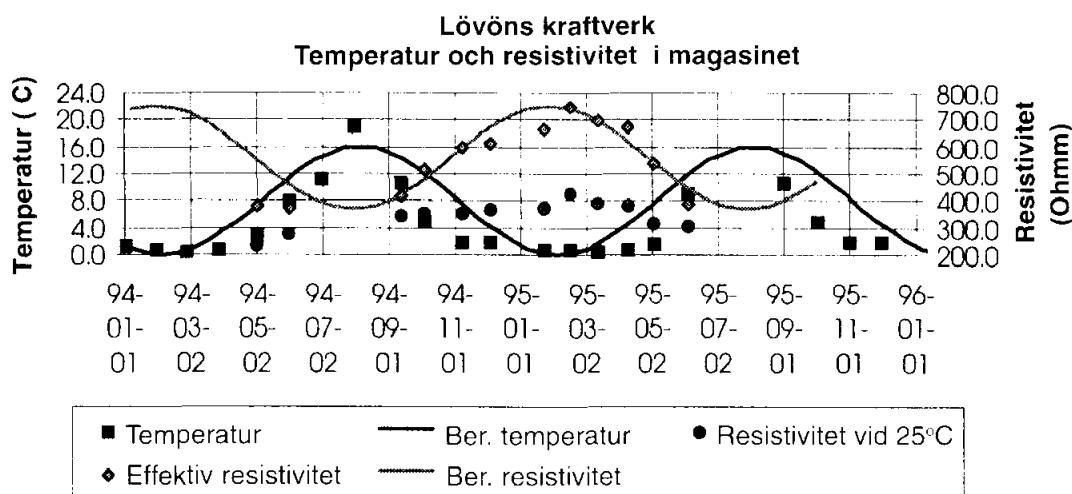
Närmast intaget är dammen grundlagd på berg vilket ger en största dammhöjd av ca 30 m. Tåtkärnan, vilken består av morän är här vertikal. Efter cirka 40 – 50 m från intaget viker dammen av och tåtkärnan övergår från vertikal till lutande. Den återstående delen av dammen är grundlagd på morän. Dammhöjden är också lägre.

Efter projektets igångsättning framkom att en jordlina är inlagd i tåtkärnan, enligt muntliga uppgifter på nedströmssidan. Jordlinans längd uppges vara några hundra meter.

År 1983 upptäcktes en sättning på dammkrönet ca 20 m från intaget. Tre år senare uppkom en ny sättning. Dammen undersöktes genom borrhning varvid resultatet tolkades som att inre erosion uppkommit i tåtkärnan. År 1992 injekterades berget samt kontaktzonen mellan berg och tåtkärna. I området närmast intaget finns sammanlagt ca 25 rör, vilka använts för injektering och för undersökning. För närvarande sker mätningar av vattenstånd och temperatur i 15 rör.

4.2. Konduktivitetsvariationer i magasinet

Konduktiviteten och temperaturen på det vatten som passerar genom kraftstationen mäts regelbundet. Temperaturen mäts varje arbetsdag medan konduktiviteten har mätts en gång per månad. Dessvärre saknas värden för sommaren 1994. Som framgår av figur 4.2 är den effektiva resistiviteten ca 750 Ωm då temperaturen är lägre än 1°C. Den lägsta resistiviteten uppkommer sommartid då temperaturen är som högst. Som framgår av diagrammet synes temperaturen hittills kunna förklara de uppkomna resistivitetsvariationerna, dvs jon-innehållet i magasinet är ganska konstant under året. Medelvärdet för den effektiva resistiviteten är ca 560 Ωm och variationen under året är $\pm 190 \Omega\text{m}$. Förloppet kan approximeras med en enkel sinuskurva utifrån det beräknade medelvärdet samt med den beräknade variationen.



Figur 4.2. Temperatur och resistivitet i magasinet vid Lövöns kraftverk.

4.3. Resistivitetsmätningar i dammen

Resistivitetsmätningarna vid Lövöns kraftverk har skett längs en 450 meter lång sträcka med start vid intaget till kraftverket. Mätningarna görs som så kallad "roll-along"-mätning för att täcka in hela mätsträckan. I samband med att stavelektrodena byttes ut mot plattor gjordes mätningar före och efter elektrodbytet, för att ge möjlighet att bedöma hur stor påverkan bytet hade. Tabellen nedan visar de aktuella mättillfällena:

Mättillfälle	Elektrodtype
1993-11-17	stav
1994-04-11	stav
1994-05-31	stav
1994-08-18	stav
1994-09-26	stav
1994-10-01	platta
1994-10-30	platta
1995-03-21	platta
1995-05-15	platta

Som nämnts har det under projektets gång framkommit att det ligger en jordledning i tät kärnan längs den sträcka på dammen som resistivitetsmätningen sker på, vilket torde påverka resultaten. Eftersom utvärderingen koncentreras på variationen mellan mättillfällena är detta troligen mindre allvarligt.

4.4. Resultat

Resultatet av Wennermätningarna i form av pseudosektion av medelvärdet av den skenbara resistiviteten framgår av figur 4.3.a, sidan 15. Resultaten visar en betydande variation i resistivitet längs profilen. De låga resistiviteter längs den nedre vänstra kanten av diagrammen är troligen en effekt av metallobjekt i dammen. För övrigt ligger de skenbara resistiviteter i intervallet 700–1 700 Ω m.

Det faktum att det är en påtaglig variation i resistivitet längs dammen tyder på att man har en signifikant inverkan av dammens egenskaper. Hade resultaten dominerats av inverkan av vattnet i magasinet skulle resultaten varierat mindre, då de elektriska egenskaperna i magasinets vatten längs dammen torde vara i stort sett homogena vid ett och samma mättillfälle. Det bör också noteras att grundläggning efter ca 50 m skett på jord där stora resistivitetsvariationer kan förekomma naturligt.

4.5. Modelltolkning

Medelvärdet av tolkade djupsektioner visas i figur 4.3.b, sidan 15. Resultaten visar en betydande variation i resistivitet längs profilen. Resultaten för de större tolkade djupen bör betraktas med försiktighet till följd av de mot djupen ökande osäkerheterna, liksom att ekvivalensprincipen och inverkan av 3D effekter kan leda till vissa geometriska förskjutningar. Modellanpassningen för tolkningen är dock god, med kvadratisk medelvärde av modellresidualer i intervallet 3,5%–6,3% (3,5%–4,2% efter elektrodbytet).

De tolkade sektionerna visar ett skikt med resistiviteter under 700 m på 5–15 m tolkat djup längs en stor del av den undersökta sträckan. Ett undantag utgörs av ett högresistivt område i intervallet 390–350 m, samt i början av profilen fram till omkring 100 m.

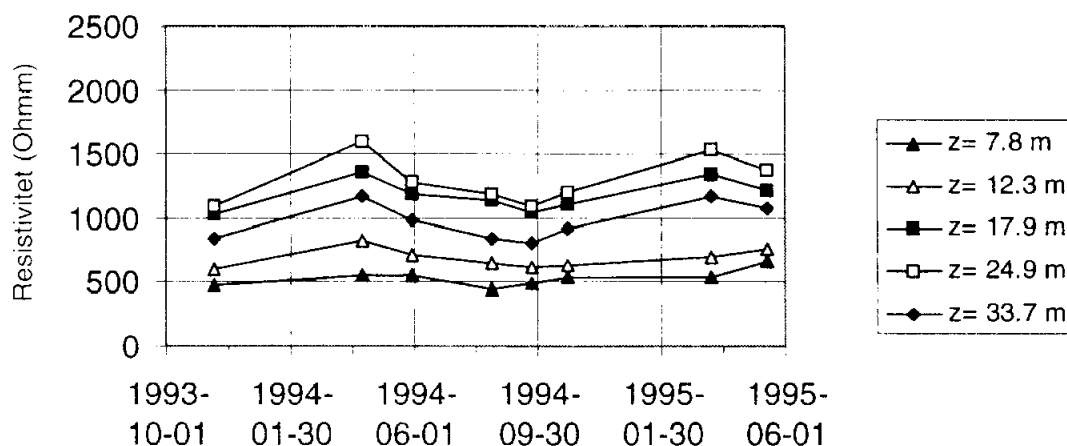
4.6. Variationer i tolkade resultat

Det är en stor variation i resistivitet mellan mättillfällena, vilket framgår av sektionen med normerad variation i figur 4.3.c, sidan 15. Variationen, liksom medelvärdena, har beräknats för såväl hela mätserien som för den årscykel som utgörs av de senaste sex tillfällena. Här återges endast de sistnämnda, då de legat till grund för vidare beräkningar.

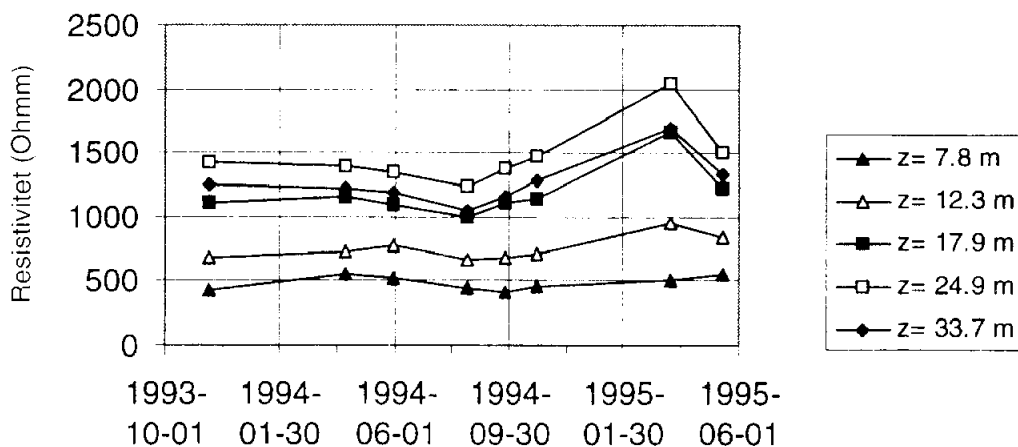
Det är, som framgår av figur 4.3.c, mycket stor variation närmast markytan, varefter den i avgränsade zoner sjunker till under 25% (avstånd 110 m, 200 m samt 390 m). Däremellan ligger variationen på 30–70%, för att stiga mot djupet. Omkring 240–250 m framträder en zon med variation över 80% på djup 20–30 m.

De stora skillnaderna i den övre delen orsakas av variationer i vattenstånd och lufttemperatur.

Resultatet från olika celler kan också redovisas för hela mätperioden, jfr figurerna 4.4 och 4.5. Därvid framkommer även när högsta respektive lägsta mätvärde uppkommer. Liksom för temperaturmätningar kan generellt konstateras att variationerna är störst i dammens övre delar och att de sedan avtar mot ökande djup. I vissa begränsade områden är dock variationerna på större djup betydande, vilket kan tolkas som att vattenströmningen där är större. Notera dock osäkerheten i djupbestämning till följd av ekvivalensprincipen, varför en noggrannare kvantifiering kräver bättre tillgång till referensdata från exempelvis borrhinar.



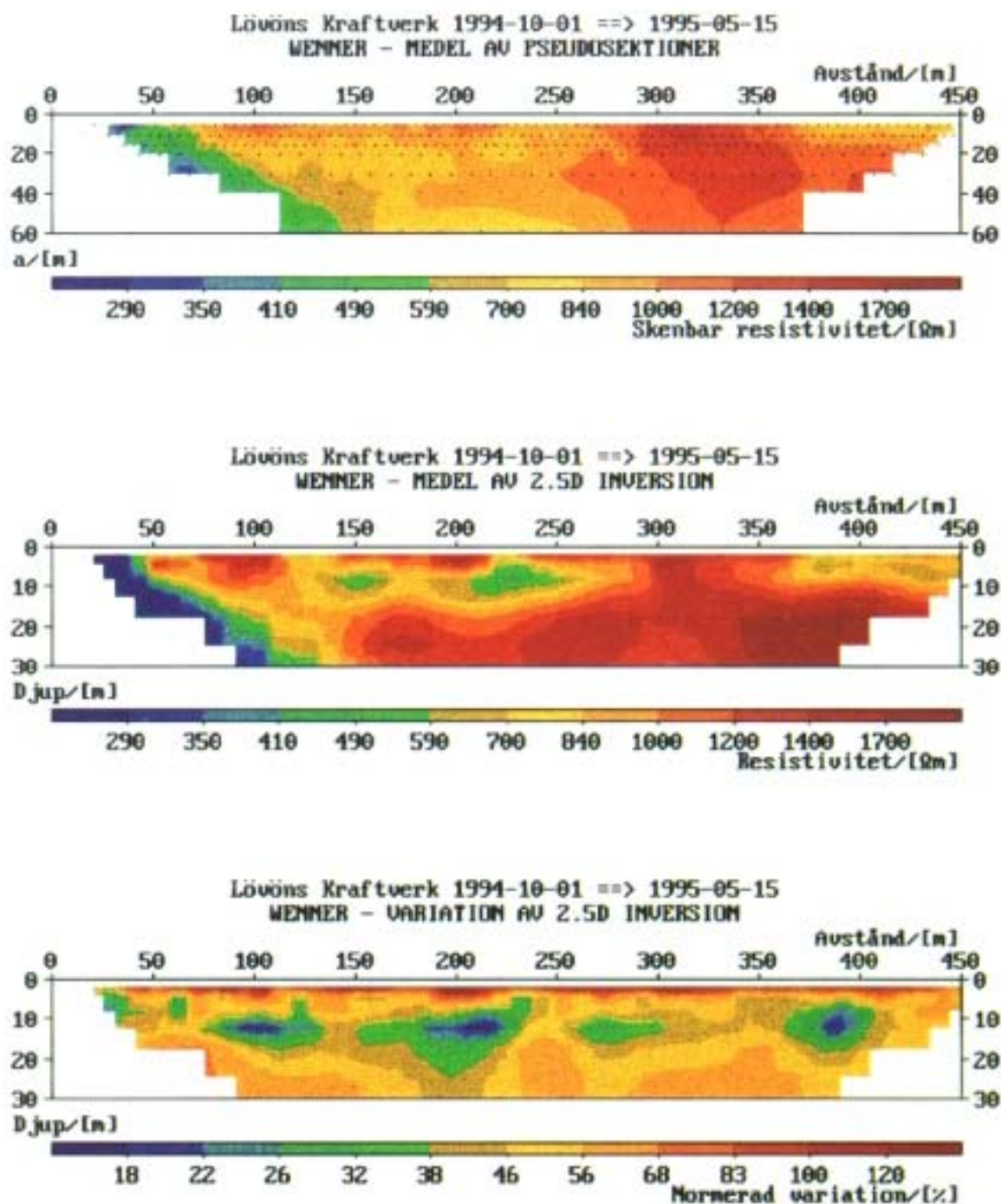
Figur 4.4. Variation i tolkade resistiviteter vid olika djup för Lövön, sektion 0/160. Angivna djup utgör mittpunkten för respektive cell i tolkad modell.



Figur 4.5. Variation i tolkade resistiviteter vid olika djup för Lövön, sektion 0/245. Angivna djup utgör mittpunkten för respektive cell i tolkad modell.

4.7. Självpotential (SP)

Självpotentialmätningar har utförts vid två tillfällen: 1994-06-03 då mätning endast skedde längs 1 200 meter på uppströmssidan, och 1994-10-31/11-01 då mätning utfördes på båda sidor längs hela dammen (ca 1 600 meter). Mätningarna på uppströmssidan har gjorts i vattenbrynet.

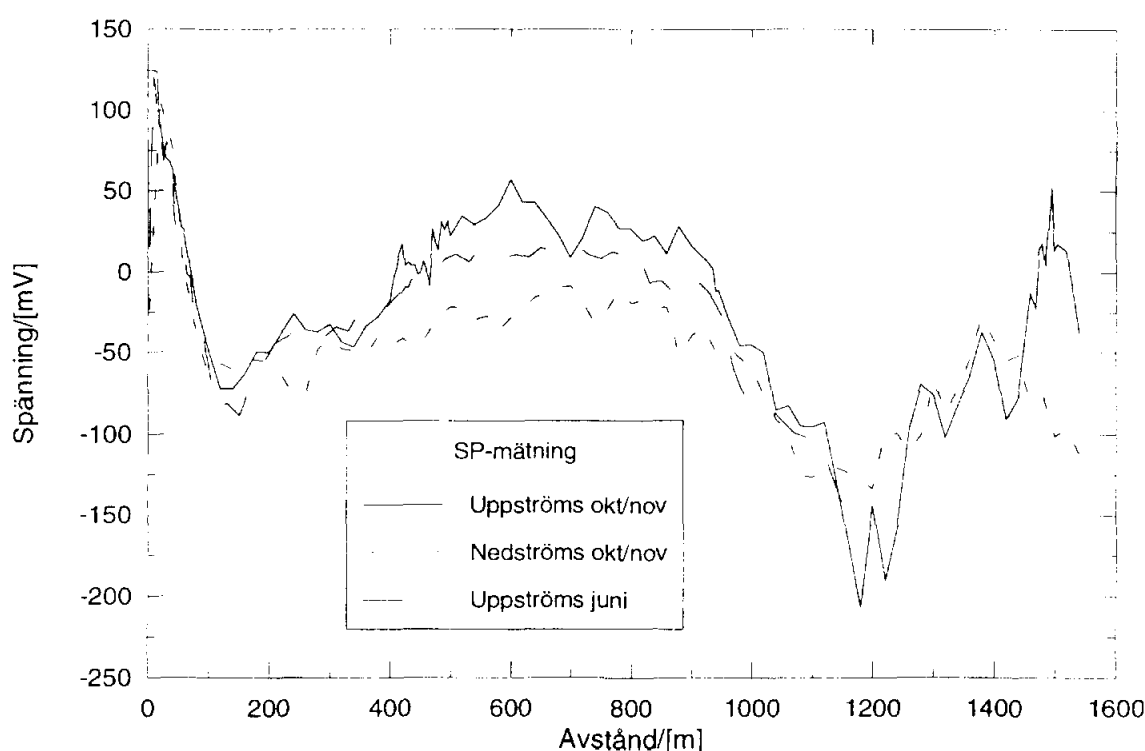


Figur 4.3. Resultat av Wennermätning på Lövöns kraftverk:
a. pseudosektion av medelvärden av skenbara resistiviteter,
b. djupsektion av tolkade resistiviteter,
c. djupsektion av normerad variation.

Resultat

Mätningarna vid de två mättillfällena visar i huvuddragen överensstämmelse längs den sträcka som mättes vid båda tillfällena, som framgår av figur 4.6, dock är amplituden i intervallet 400–950 meter mindre i profilen som mättes upp i juni. Profilerna uppvisar en kraftig variation i potentialnivåer längs profilen, som längs delar av sträckan är omvänt korrelerade till varandra på uppströms- och nedströmssidan. De kraftiga positiva anomalierna i början av profilen, närmast intaget till kraftverket, är troligen orsakade av störningar från kraftverket och metallobjekt i dammen.

Bakgrundsmätningen som pågick samtidigt med SP-profileringen vid det andra mättillfället gav en mycket liten variation.



Figur 4.6. Resultat av SP-mätningar vid Lövöns kraftverk.

Tolkning

Enligt tidigare erfarenheter av SP-mätning (t ex Corwin 1990) kan man förvänta sig negativa anomalier på uppströmssidan vid läckage, vilket skulle innebära att det kan vara läckage i området upp till 450 meter samt kring 1 200 meter. På motsvarande sätt kan man förvänta sig positiva anomalier i ett utströmningsområde på nedströmssidan, och avsaknaden av motsvarande sådana kan bero på att utströmningsområdena ligger längre nedströms.

4.8. Erfarenheter

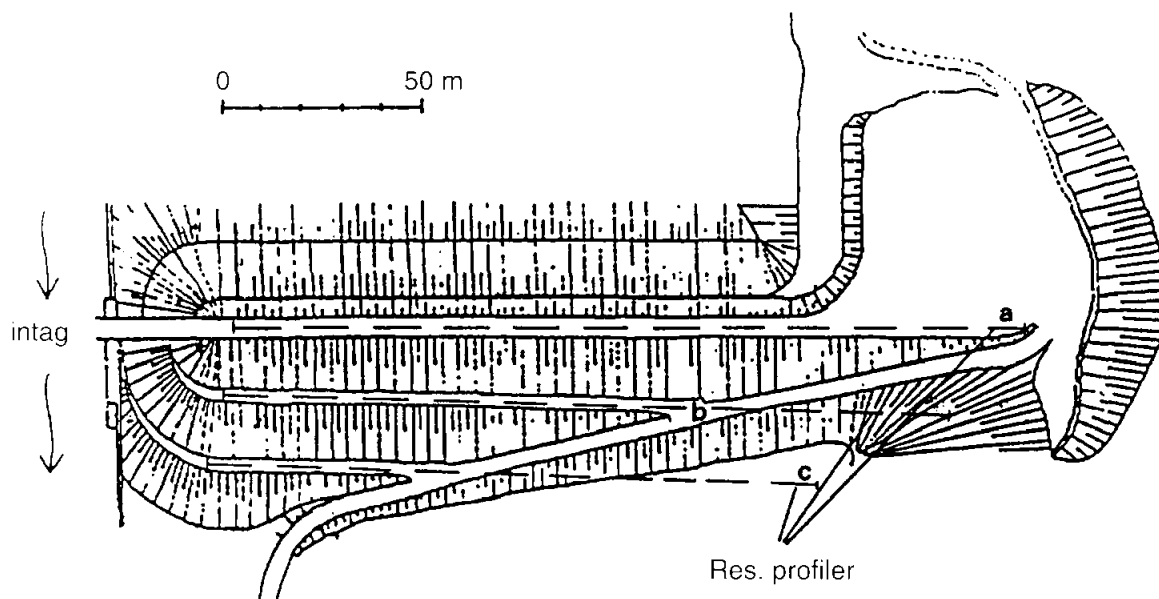
Mätningarna med Wennerkonfiguration har givit mycket stabila resultat, i synnerhet sedan elektroderna byttes mot plattelektroder. Även SP-mätningen gav stabila resultat som varierade måttligt vid kontrollmätning av bakgrundsvariationen.

5. MOFORSSEN – MÄTRESULTAT OCH KVALITATIV TOLKNING

5.1. Beskrivning av dammen

Dammen är 40 m hög och sammanlagt 330 m lång, inklusive kraftstation, utskov och jorddamm med krönnivån +75 m. Jorddammen har en vertikal tätkärna omgiven av mäktig stödjord av dränerande material (grus och sand). Dessutom finns ett övergångslager mellan tätkärnan och stödjorden nedströms. På uppströmssidan och på dammkrönet är stödjorden täckt med 0,5 m grovfilter vilken i sin tur är täckt med ca 2 m sprängsten som erosionsskydd. På nedströmssidan finns två terrasser på nivåerna +67 och +59 m.

Anläggningen är belägen i en smal dalgång med branta stränder. Kraftstationen ligger på älvens högra sida och är grundlagd på berg (figur 5.1). Även utskoven, som är placerade i den ursprungliga älvfårans läge, är grundlagda på berg. Där jorddammen ansluter mot utskovet finns en spont som nedförts till berg. Jorddammen är med undantag av anslutningen mot utskovet grundlagd på morän. Moränen vilar på högerpermeabla material bestående av sand, grus och block. För att minska vattenströmningen under dammen injekterades materialet vid uppförandet av dammen. Efter projektets igångsättning framkom att en jordlina av oisolerad metallvajer är inlagd i tätkärnan, enligt konstruktionsritningar i tätkärnans mitt på ca 30 meters djup under dammkrönet. Jordlinan sträcker sig enligt ritningen längs i stort sett hela tätkärnan.

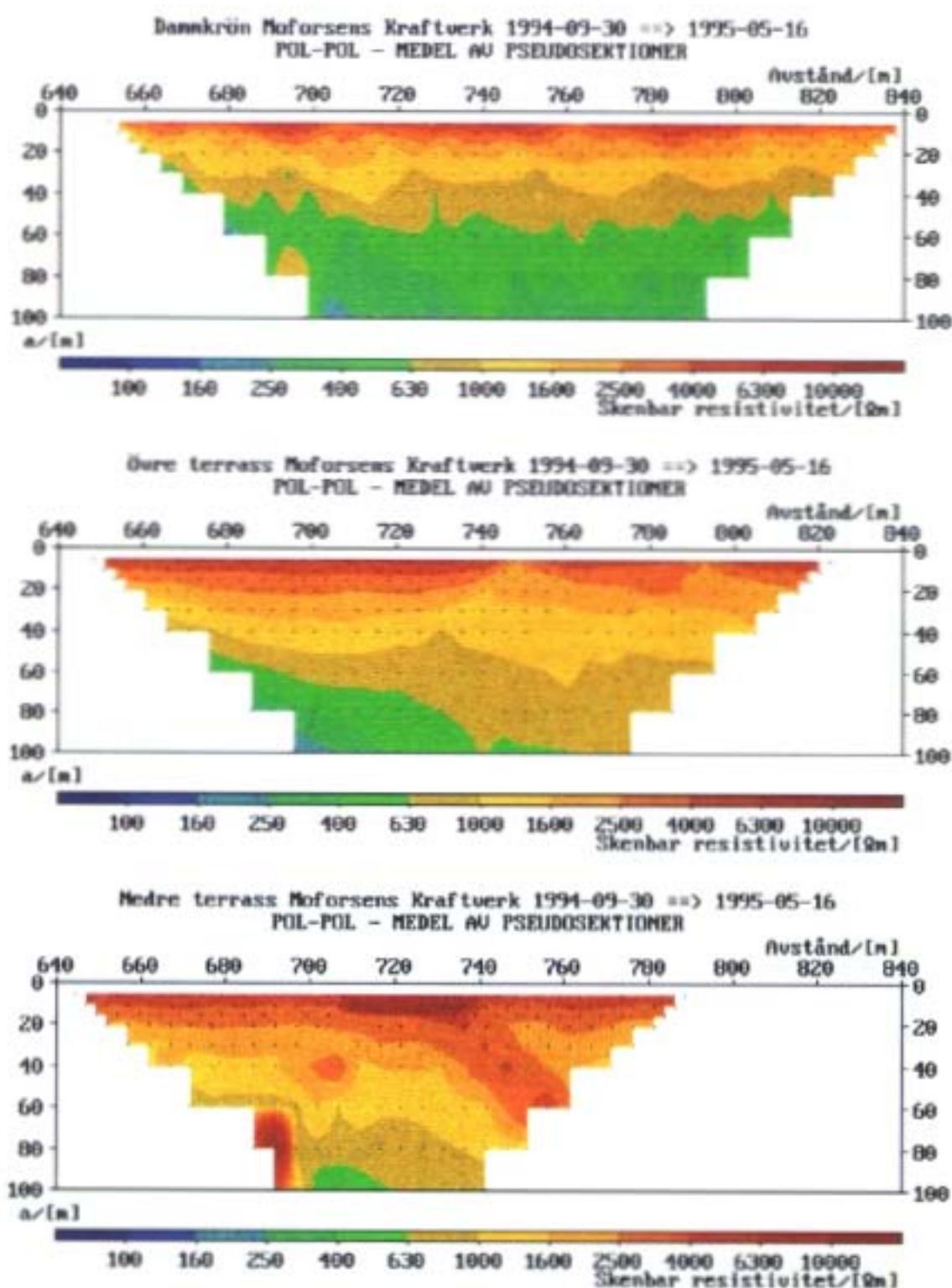


Figur 5.1. Moforsens kraftverk: skiss över jorddammen och resistivitetsprofilernas läge.

Bergnivån är som lägst vid jorddammens mitt vid sektion U=750, där också ett lager med hög vattengenomsläpplighet konstaterats. Detta område börjar vid ca U=730 och sträcker sig till ca U=810. Formationens mäktighet uppgår till ca 10 m som högst.

5.2. Konduktivitetsvariationer i magasinet

Magasinsvattnets temperatur och konduktivitet har mätts varje vecka sedan maj 1994 (figur 5.2). Även här kan ett tydligt samband konstateras mellan temperatur och resistivitet.

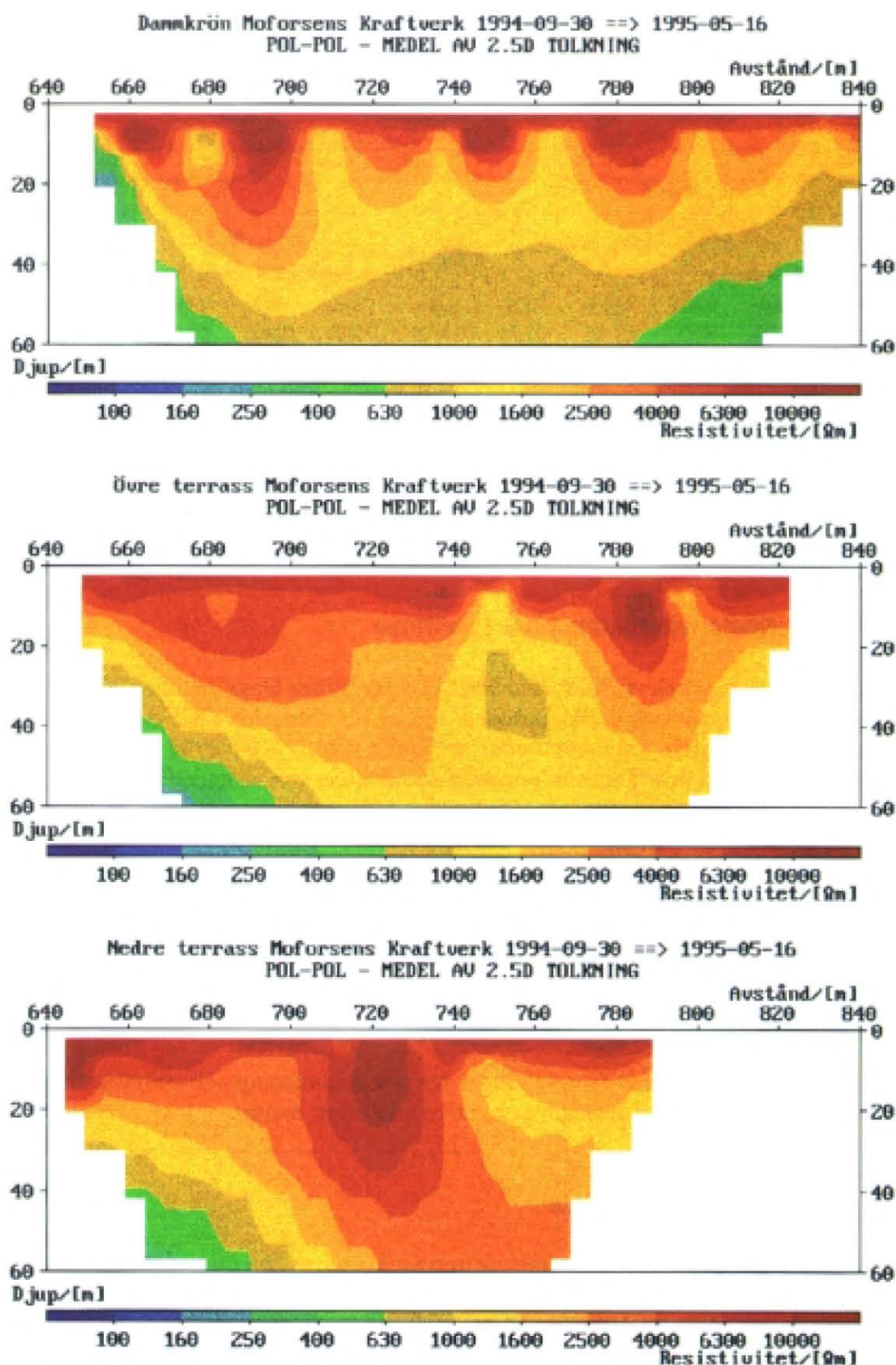


Figur 5.3. Medelvärde av pol-polpseudosektioner Moforsens kraftverk:

a. dammkrön

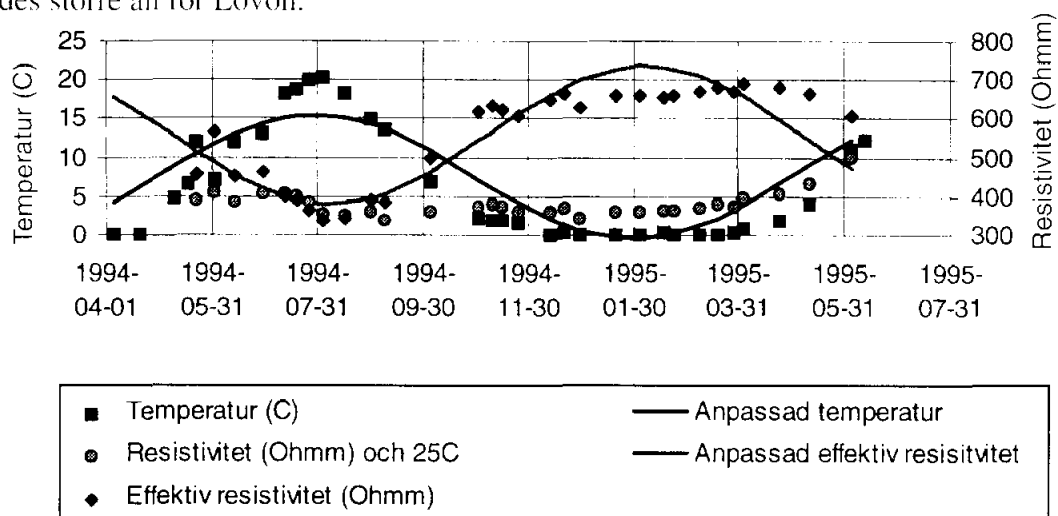
b. övre terrass,

c. nedre terrass. Den kraftigt avvikande punkten för nedre terrassen (i nedre vänstra hörnet) beror på mätfel, och har avlägsnats före inversionen.



Figur 5.4. Pol-poldjupsektion av medelvärden av tolkade resistiviteter Moforsens kraftverk:
a. dammkrön,
b. övre terrass,
c. nedre terrass.

Det hittills högsta uppmätta värdet är ca 700 Ωm då temperaturen var nära 0°C. Det lägsta värdet hittills är ca 330 Ωm vilket uppmättes i augusti 1994. Resistivitetsvariationerna är således större än för Lövön.



Figur 5.2. Temperatur och resistivitet vid Moforsens kraftverk.

5.3. Resistivitetsmätningar i dammen

Resistivitetsmätningarna vid Moforsens kraftverk har utförts längs tre linjer: längs dammkrönet, övre terrassen och nedre terrassen. Vid de två terrasserna har elektrodutläggen förlängts utanför själva terrasserna efter det andra mättillfället. Syfte var att förbättra djupnedträngningen och få mer information av moränen som dammen är grundlagd på, liksom de underliggande lagren av mer permeabelt material.

Mättillfälle	Elektrodtyp
1994-06-01	stav
1994-08-20	platta
1994-09-30	platta
1994-11-02	platta
1995-03-22	platta
1995-05-16	platta

För pol-polmätningarna har fjärrelektroder för potentialmätning och strömsändning använts ca 500 m uppströms respektive ca 700 m nedströms dammen.

5.4. Variation i mätdata

Resultaten av pol-polmätningarna framgår av figur 5.3, sidan 18, i form av pseudosektioner av genomsnittlig skenbar resistivitet. Dessa diagram baseras på de fyra senaste mättillfällena, till följd av att dessa har högst datakvalitet och störst täckning. Resistivitetskontrasten mellan det torra grovkorniga materialet närmast ytan och det djupare liggande materialet är mycket stor, medan variationerna inte är så stora längs profilerna med undantag av där de nedre profilerna passerar vägen. Vid mättillfället i mars 1995 var det svårt att få ned ström i marken till följd av tjalningen, vilket avspeglar sig i några datapunkter som givit extrema mätvärden (figur 5.3.c, sidan 18).

5.5. Modelltolkning

Figur 5.4, sidan 19, visar medelresistiviteten i tolkade djupsnitt. I resultatet från dammkrönet syns ett regelbundet mönster med cirka 25–30 meters intervall mellan punkter med lägre resistiviteter, med början vid cirka 680 meter, mellan de för övrigt mycket höga resistiviteter nära markytan. Ett liknande mönster syns vid 750 meter på den övre terrassen. Det har inte gått att korrelera dessa mönster med kända rör eller andra installationer. För övrigt framträder ett högresistivt område i anslutning till vägen i övre och nedre terrassen.

Vid tolkningen användes ett inledande mjukhetsband på 0.15, med minimum 0.03 ("normala" mjukhetsband). Fem iterationer gjordes för varje mätsektion. Resultatet av tolkningen är känsligt för val av de olika parametrarna i modelltolkningen, varför samma inställningar använts genomgående för att ge bästa möjliga jämförbarhet. Modellresidualerna vid modelltolkningen har blivit relativt stora, det kvadratiske medelvärdet ligger i intervallet 10–20%. De stora modellresidualerna kan bero på att antagandet om tvådimensionell geometri ej är uppfyllt. Vidare torde de stora resistivitetskontrasterna ge vissa numeriska svårigheter. Störst är modellresidualerna för den nedre terrassen, vilket orsakas av de stora variationerna i anslutning till vägen.

5.6. Variationer i tolkade resultat

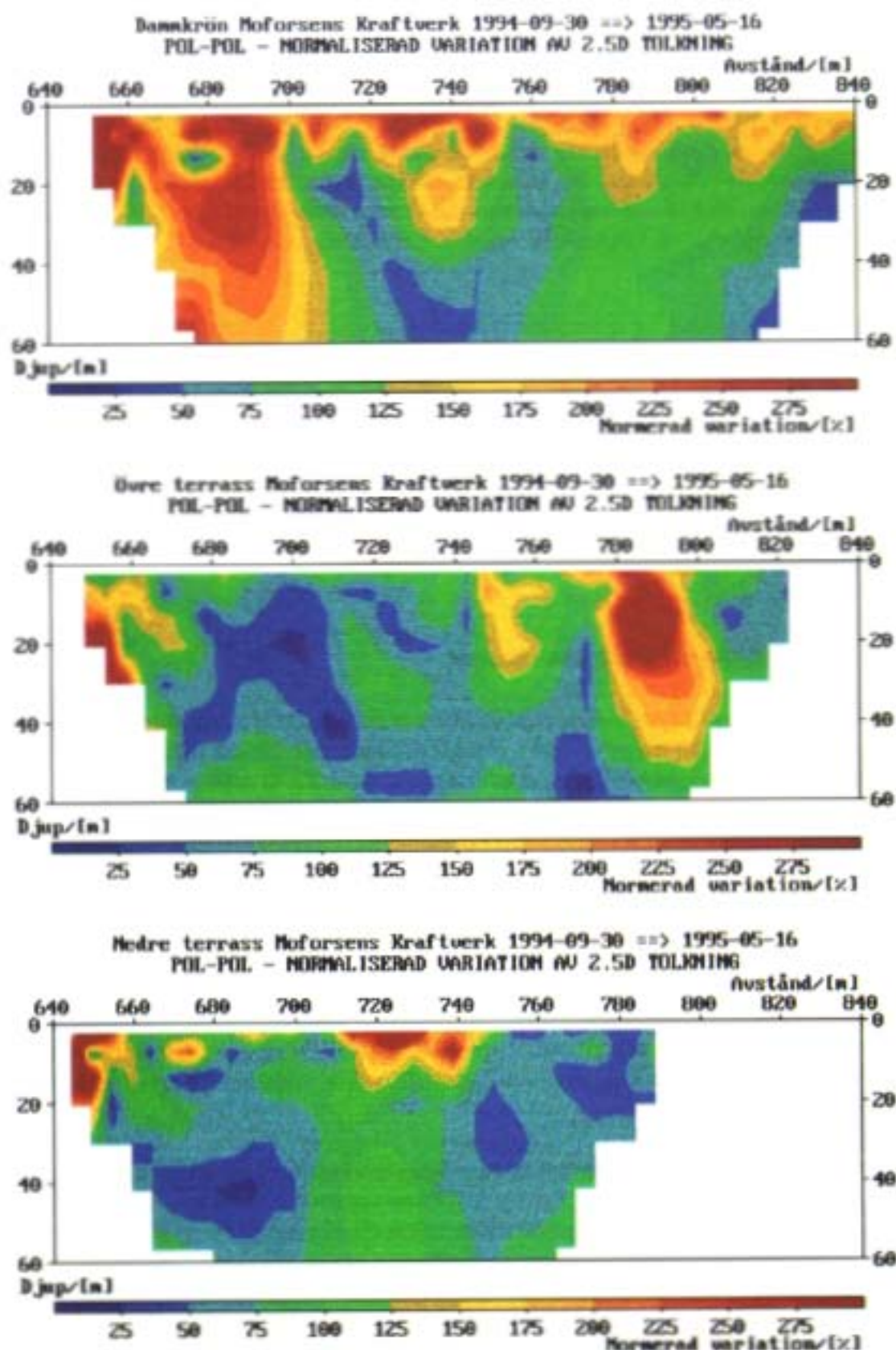
Variationen i uppmätta data mellan mättillfällena är mindre än motsvarande resultat från Lövön, men tolkningen har resulterat i påtagliga variationer mellan mättillfällena. Den normerade variationen, vilken framgår av figur 5.5, sidan 22, är som synes stor. Att den normerade variationen är större än 1 kan bero på flera faktorer. En intressant faktor är att jonerna och temperaturen har olika transporthastigheter vid passagen genom dammen (jfr kapitel 6). Dessas inverkan på resistiviteten i dammen måste därför superponeras, vilket innebär att variationen inuti dammen kan bli större än variationen i magasinet. Dessutom kan mät- eller tolkningsfel ej uteslutas. Ett större antal mätningar hade härvidlag givet ett säkrare underlag.

För dammkrönet är variationen störst i de översta 10 metrarna, samt vid anslutningen till utskovsdelen. Vidare syns ett parti med stor variation på 20–30 meters tolkat djup omkring 680–690 meter. På större djup syns ett parti med större variation omkring intervallet 760–790 meter.

Övre terrassen uppvisar något mindre variation längs markytan, men även här indikeras stor variation i anslutningen till intagen. Partier med större variation syns omkring 10–20 meters djup vid 760 och 790 meter, samt på 60 meter tolkat djup omkring 680 och 790 meter.

Den nedre terrassen uppvisar generellt en lägre variation, även vid markytan, med undantag av intill intaget samt i anslutning till vägen omkring 720–740 meter. Ett parti med något större variation framträder från omkring 30 meters tolkat djup och nedåt i området 710–730 meter.

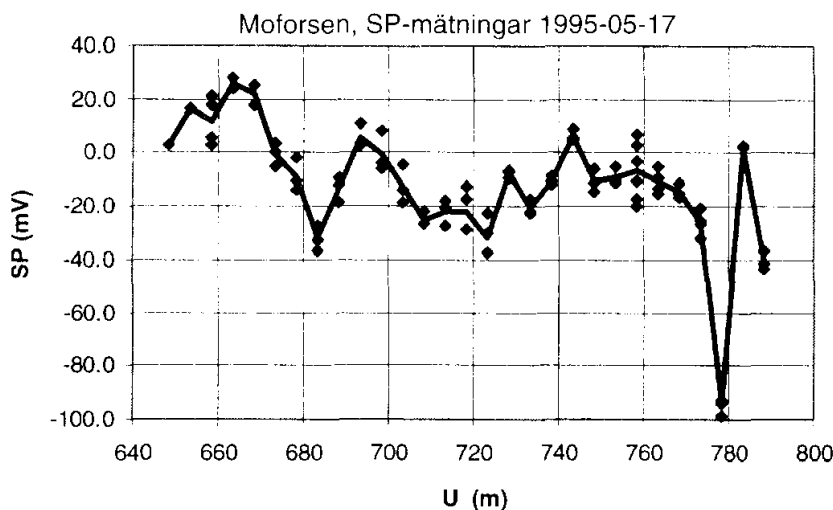
Eftersom anomalier ej korrelerar mellan mätlinjerna, visar det att antagandet om 2D ej är uppfyllt.



Figur 5.5. Pol-poldjupsektion av medelvärde av normaliserad variation Moforsens kraftverk:
a. Dammkrön,
b. övre terrass,
c. nedre terrass.

5.7. Självpotential

SP-mätningarna har givit relativt stor variation med taggiga kurvor som resultat (figur 5.6), och det bedöms som osäkert att dra några särskilda slutsatser av materialet. Vid mätningen fluktuerade resultaten mycket, varför resultaten bedöms som osäkra.



Figur 5.6. Exempel på uppmätta SP-data Moforsens kraftverk. Mätningarna är utförda med elektroderna i magasinet längs dammens uppströmssida.

5.8. Erfarenheter

Pol-polmätning ger en betydligt större djupnedträngning än Wennermätning med motsvarande elektrodavstånd (fjärrelektroderna oräknade), men ger sämre upplösning i djup-tolkningen med samma datamängd. Troligen skulle detta delvis kunna uppvägas om man samlar in en betydligt större mängd data än vad som gjorts här. Detta är fullt möjligt men mycket tidsödande med det instrument som använts här.

Vidare är pol-polmätning betydligt mera utsatt för mätbrus, eftersom de långa kablarna till referenselektroderna fungerar som antenner som plockar upp telluriska variationer och elektriskt brus orsakat av mänskliga installationer. I samband med fältmätningarna har noterats stor instabilitet vid mätningen vid vissa tillfällen. Ibland har det därför varit nödvändigt att avbryta mätningen och invänta lägre brusförhållanden. Detta gör att det vore önskvärt att mäta reciprokt, d v s repetera alla mätningar med omkastade ström- och potentialelektroder, för att ge ett direkt mått på mätfelens storlek. Detta skulle dock kräva ett nytt mätinstrument för att vara praktiskt genomförbart, som exempelvis mäter i flera kanaler simultant och därmed reducerar mättiden i motsvarande grad.

Resultaten visar ett behov av utveckling av andra mätstrategier. Detta skulle till exempel kunna vara så kallad tomografisk mätning mellan elektroder som omger och eventuellt även penetrerar mätobjektet.

SP-mätningarna visade på stor fluktuation i bakgrunds nivåerna vid ett par provmätningar, genom att mätvärdena var mycket instabila. Detta visar att det torde vara nödvändigt att upprepa mätningarna under en tillräckligt lång tid för att bearbeta data statistiskt, som föreslagits av exempelvis Triumf et al (1995).

6. METODIK FÖR KVANTIFIERING AV VATTENSTRÖMNING

6.1. Grundläggande teori

Vattenströmningen, q ($\text{m}^3/\text{s}/\text{m}^2$), genom en damm beror främst av tryckskillnaden, dh över dammen och tät kärnans hydrauliska konduktivitet, K (m/s). Sambandet är svårt att formulera fullständigt och korrekt bland annat beroende på tät kärnans geometri som ger upphov till källsprång på dess nedströmssida. Oftast används därför förenklade samband mellan tryck och flöde för beräkning av K , exempelvis Darcys lag, jfr Bear (1979):

$$q = K * dh/dx \quad (\text{ekv 6.1})$$

Darcy's lag enligt ovan beskriver endimensionell vattenströmning. Dupuit har utvecklat sambandet för två dimensioner utan källsprång, vilken också finns redovisad i exempelvis Bear (1979). Polubarinova-Koshina (1962) presenterar vidare en tvådimensionell lösning där även källsprångets läge beaktas.

Eftersom det är svårt att utvärdera K -värdet har därför utvärderingsprincipen fokuserats på att utvärdera flödet eftersom flödet är den primära parametern vid läckage. Resultatet kan därefter omräknas till K -värde enligt exempelvis Darcy's lag, vilken för detta sammanhang bedöms ge tillräcklig noggrannhet.

Eftersom vattenströmningen endast sker genom porerna i den vattenmättade delen av tvärsnittet blir den verkliga hastigheten högre. Denna hastighet kallas porhastigheten v_n (m/s) och skrivs:

$$v_n = q/n \quad (\text{ekv 6.2})$$

där n betecknar porositeten. Om ett spårämne följer med vattnet kommer det därför att transporteras med porhastigheten. Genom att lokala variationer förekommer i tryckfältet liksom i jordmaterialet kommer vattenströmningen att påverkas, vilket ger upphov till dispersion. Dispersionen medför att en puls utjämnas med tiden, dels genom molekyulär diffusion dels genom omblandning vid den advektiva transporten.

När vatten med avvikande temperatur transporteras med flödet kommer det att följa den termiska hastigheten v_T som definieras Claesson et al (1985):

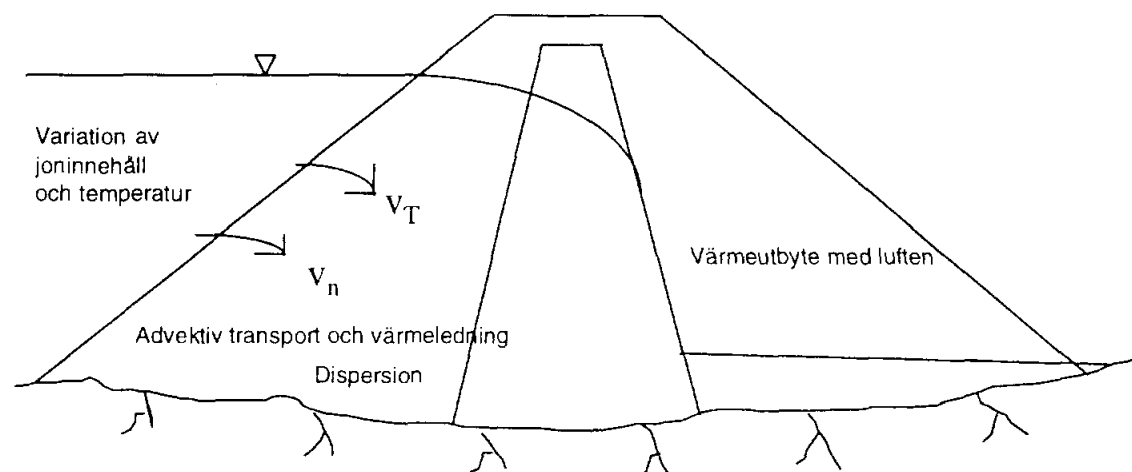
$$v_T = q * C_w / C \quad (\text{ekv 6.3})$$

där C_w är vattnets volumetriska värmekapacitet ($\text{J}/\text{m}^3/\text{K}$) och C är jordmaterialets volumetriska värmekapacitet. För flertalet jordmaterial är C cirka $2 \text{ MJ}/\text{m}^3/\text{K}$, medan C_w är konstant $4.16 \text{ MJ}/\text{m}^3/\text{K}$. Oftast sker värmetransporten i ett begränsat område vilket innebär värmeutbyte med omgivande material. Detta innebär att även temperaturpulsens dämpas ut med tiden, speciellt om vattenströmningen sker i en strömningskanal med liten tvärsnittsarea. I den övre delen av dammen påverkas också temperaturen av luftens säsongsmässiga temperaturvariationer.

Vid varierande effektiv resistivitet i ett magasin kommer denna att fortplantas in i dammen med läckagevattnet. Den variation som härrör från det varierande joninnehållet kommer att

transporteras med porhastigheten medan den temperaturorsakade variationen kommer att förflyttas med den termiska hastigheten. Dessutom tillkommer värmeledning samt mekanisk och termisk dispersion.

Den tidsmässiga variationen av resistiviteten i dammen kan följas genom kontinuerliga resistivitmätningar. En fullständig tolkning av transportprocessen är som synes komplex, vilket illustreras i figur 6.1. Eftersom resistiviteten beror av joninnehållet och temperaturen möjliggör metoden en kvantifiering av vattenströmningen, under vissa förenklade antaganden enligt de ovan presenterade grundprinciperna.



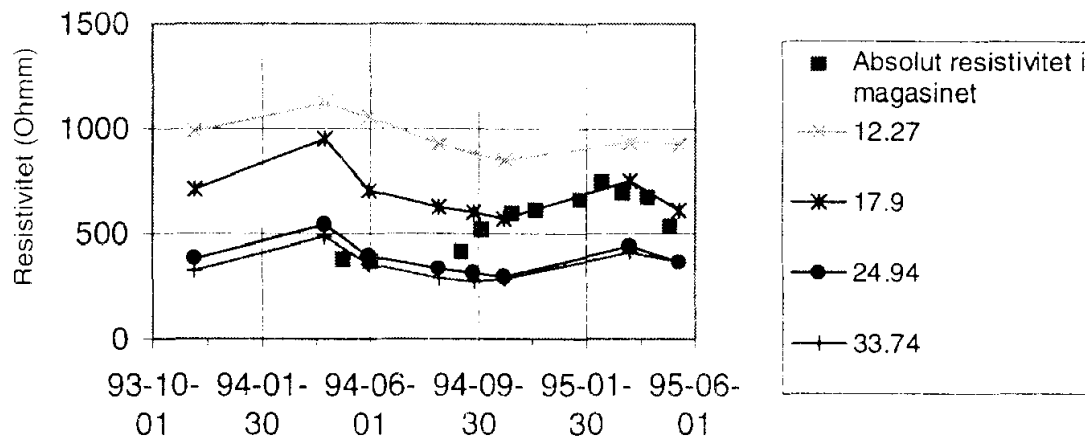
Figur 6.1. Transportprocesser som påverkar resistiviteten i en fyllningsdamm.

6.2. Utvärdering av fasförskjutning

Den enklaste formen för utvärdering är att jämföra extrempunkter för den effektiva resistiviteten i magasinet och för den utvärderade resistiviteten i dammen. Ur diagrammen kan man beräkna fasförskjutningar för högsta respektive lägsta värdet, jfr figur 6.2, sidan 26, som visar mätresultat från Lövön. För att få hög noggrannhet för detta erfordras täta mätningar, vilket ej är fallet i detta projekt där mätningar skett med 1–2 månaders intervall, vilket medför att viss interpolation mellan mätpunkterna erfordras. Som framgår av figuren kan fasförskjutningen uppskattas till ca 1–2 månader för det högsta värdet och ca 2–3 månader för det lägsta värdet. På grund av det jämförelsevis glesa mätintervallet blir de utvärderade fasförskjutningarna approximativa. Om tätare mätningar utförts skulle förmodligen fasförskjutningarna blivit mindre. Det innebär att den verkliga vattenströmningen är högre än den utvärderade.

Om vi antar att mätsektionen är representativ för tätkärnans mitt kan avståndet, x , till inströmningsranden beräknas med kännedom om dammens geometri. Med hjälp av en ur diagrammen erhållen fasförskjutning, t_d , kan transporthastigheten beräknas som $v = x/t_d$.

Om vi antar att jonhalten är konstant under året och att de effektiva resistivetsvariationerna enbart beror av temperaturvariationerna kan vi försumma den transport av joner som sker med porhastigheten. Den uppmätta resistivetsvariationen i dammen beror därför endast av



Figur 6.2. Exempel på resistivitetsvariationer i magasinet och i dammen på olika djup i Lövön. (Observera att djupen är approximativa och utgör mittpunkten för respektive cell i den tolkade modellen).

den transport som sker med den termiska hastigheten. Med hjälp av ekv 6.3 kan då det ur temperaturvariationen utvärderade flödet q_T skrivas som:

$$q_T = C/C_w \cdot x/t_d \quad (\text{ekv 6.4})$$

Det vertikala värmeutbytet medför att den uppmätta transporttiden blir större än den verkliga. Det utvärderade flödet q_T blir därför lägre än det verkliga flödet. Principiellt blir skillnaden mindre vid stora läckage på stora områden än vid små läckage med liten tvärsnittsarea (några dm^2) i strömningsriktningen. För områden större än ca 10 m^2 bedöms skillnaden vara liten.

Om vi istället antar att den effektiva resistiviteten enbart beror av jonhaltens variation kan flödet med hjälp av ekv 6.2 skrivas som:

$$q_n = n \cdot x/t_d \quad (\text{ekv 6.5})$$

Ekvationen beaktar ej dispersionens inverkan på transporten. Vid rådande förhållanden kan diffusionen försummas eftersom det är rimligt att anta att transporthastigheten är betydligt större. Varken dispersionen eller diffusionen påverkar färförskjutningen utan enbart pulsens amplitudrespons i dammen. Den uppmätta transporttiden bör därför approximativt överensstämma med den verkliga. Problemet är att bestämma porositeten som är ett medelvärde för hela transportsträckan.

Skillnaden mellan dessa båda antagandena kan illustreras genom att sätta in rimliga värden. Porositeten bör normalt understiga ca 0,2 i tät kärnan och C är ungefär $2.0 \text{ MJ/m}^3/\text{K}$ vilket ger att C/C_w blir ca 0,5. De utvärderade flödena kan då skrivas:

$$\begin{aligned} q_T &= 0,5 \cdot x/t_d \\ q_n &= 0,2 \cdot x/t_d \end{aligned} \quad (\text{ekv 6.6})$$

För läckageområden större än ca 10 m² kan approximativa gränser sättas för det verkliga flödet q , oberoende av vilken transportprocess som ger fäsförskjutningen t_d :

$$0,2 \cdot x/t_d < q < 0,5 \cdot x/t_d \quad (\text{ekv 6.7})$$

Skillnaden mellan de båda utvärderingsmetoderna är ca en faktor 3, vilket kan anses vara acceptabelt i detta sammanhang.

6.3. Utvärdering av amplitud

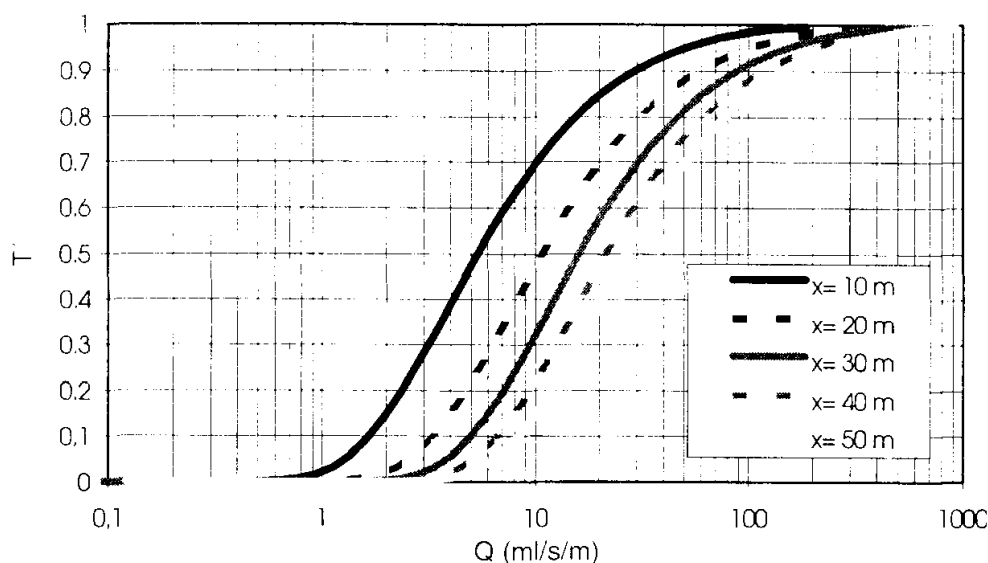
Ofta antas att jonutbyte ej sker mellan mineralkornen och det passerande vattnet. Detta innebär att någon förändring av joninnehållet ej skulle erhållas då en puls passerar genom dammen. Om variationerna i magasinet antas domineras av det totala joninnehållet skulle heller ingen dämpning ske av pulsen vid passage genom dammen. Som ovan nämnts förekommer dock dispersion, vilket strävar mot att utjämna pulsen. Några försök att utvärdera dispersionen har dock ej gjorts inom detta projekt. Utvärdering av amplituden kan emellertid göras om vi antar att de uppmätta resistivitetsvariationerna i dammen härrör från temperaturvariationerna i magasinet. Den dämpning som då erhålls beror främst av värmeledning vinkelrätt mot strömningsriktningen.

Utgående från amplituden kan temperaturmätningar och resistivitetsmätningar utvärderas på liknande sätt. För utvärdering av temperaturmätningar har en modell framtagits som anger en relation mellan uppmätt årlig temperaturvariation i dammen och vattenströmningen genom mätpunkten, Claesson et al (1995). Genom kontinuerliga mätningar erhålls underlag för utvärdering både med avseende på temperaturpulsens fäsförskjutning och dämpning.

Modellen är tvådimensionell och förutsätter bland annat att vattenströmningen sker genom en zon med en viss höjd. Denna höjd framgår ur de vertikala temperaturprofiler som erhålls genom minst månadsvisa mätningar. Metoden kan approximativt användas även om inte zonens höjd kan bestämmas exakt, jfr Johansson et al (1995). I detta fall fås inte flödet per m² utan istället erhålls flöde per m damm, Q (m³/s/m).

Primärt måste en medelströmningslängd från inströmningssektionen till mätsektionen bestämmas. Denna längd, vilken kallas x , beror bland annat på aktuellt mätdjup och den antagna mätsektionens läge. Samband mellan den dimensionslösa temperaturvariationen T' och flödet kan beräknas för olika avstånd x . För beräkningarna måste materialets värmeledningstal anges. Ett exempel på ett approximativt samband mellan flöde och T' visas i figur 6.3, sidan 28. Som framgår av diagrammet ökar temperaturvariationerna med flödet. Om variationerna uppmäts på stort avstånd från inströmningssektionen innebär det att vattenströmningen blir högre än om mätningar utförts närmare sektionen. Detta beror på den dämpning i jordmaterialet som erhålls då temperaturpulsens passerar genom dammen. Av figuren framgår också temperaturmätningarnas begränsade mätområde. För exempelvis $x = 10$ m kan endast flödet kvantifieras inom intervallet ca 1 till ca 100 ml/s/m. Om $T' = 0$ kan vi dock se att vattenströmningen är mindre än ca 1 ml/s/m och på samma sätt fås att om $T' = 1$ är vattenströmningen större än ca 100 ml/s/m.

Om vi antar att joninnehållet i magasinet är konstant, samt att jonutbytet mellan mineral-kornen och det genomströmmande vattnet är försumbart, kan man visa att T' kan ersättas



Figur 6.3. Approximativt samband mellan T (kvoten mellan årlig temperaturvariation i dammen och temperaturvariation i magasinet) och vattenströmning Q , vid antagen värmeledning 2.5 W/m/K .

med den motsvarande dimensionslösa resistivitetsparameter som definierats tidigare, nämligen den normerade resistiviteten. Det innebär att vi har ett direkt samband mellan normerad resistivitet och flöde. Indata till utvärderingsmodellen är pulsens amplitud. Resultatet är därför oberoende av den indata som ges till de tidigare utvärderingsmodellerna, vilka baseras på fasförskjutningen. Oberoende utvärdering kan därför göras med de olika metoderna, vilket möjliggör viss kontroll av resultatet. Några manuella exempel på utvärderingar redovisas nedan. På sikt bör ett beräkningsprogram tas fram där utvärderingen görs för en hel damm med den normerade resistivitetsvariationen som indata. Resultatet skulle då bli en sektion där olika flöden anges intervallvis.

Tabell 6.1. Sammanställning av indata samt resultat för olika utvärderingsmodeller.

Metod	Indata		Utvärderade flöde (ml/s/m^2) på olika djup (m)				
Resistivitet		Fasförskjutning	12	18	25	34	
- fas, termisk hastighet	$C_w/C=0,5$	ca 2 mån	1,2	1,7	2,4	3,2	
- fas, porhastighet	$n=0,2$	ca 2 mån	0,5	0,7	1,0	1,3	
- amplitud			0,8	1,3	2,3	2,5	
Temperatur		Fasförskjutning	18,5	20,5	22,5	24,5	27
-fas	$C_w/C=0,5$	0,5 - 4 mån	7,1	7,9	2,2	1,6	1,3
			18,5	20,5	24,5	29,5	
- amplitud	$\lambda=2,5 \text{ W/m/K}$		19	19	1,2	0,8	
På djupen 24,5 och 29,5 m har antagits att $H=5 \text{ m}$.							

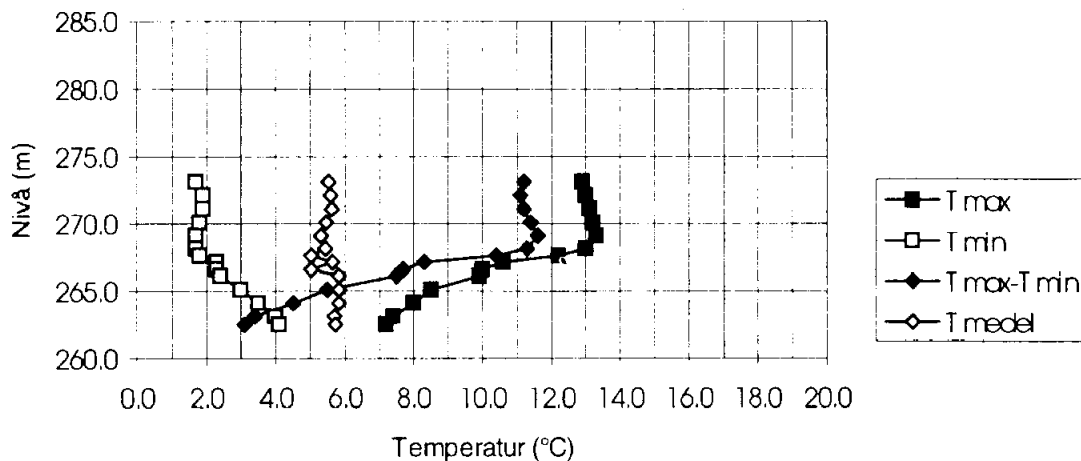
6.4. Utvärdering av mätningarna vid Lövön

Resistivitetsens fasförskjutning i sektion 0/100 i Lövön är omkring två månader som medelvärde vid jämförelse mellan högsta och lägsta värde, jfr figur 5.2, sidan 20. Eventuellt kan fasförskjutningen vara något kortare på ca 34 m djup. Med tanke på det glesa mätintervall är det dock inte befogat att försöka bestämma fasförskjutningen närmare än hela månader. Eftersom tätkärnan lutar antas att x = djupet till utvärderingscellens mitt. Detta innebär att vattenströmningen ökar med ökande djup, eftersom den utvärderade fasförskjutningen är samma för alla mätdjup, tabell 6.1. Utvärderingen visar att flödet är ca 1 ml/s/m^2 och att det ökar något mot djupet. Resultaten från de översta 10 m har ej medtagits eftersom dessa störs av varierande vattenstånd, temperaturvariationer, tjälning etc.

Utvärdering av resistivitetsmätningarna enligt amplitudmetoden ger ungefär samma resultat, dvs ca 1 ml/s/m^2 .

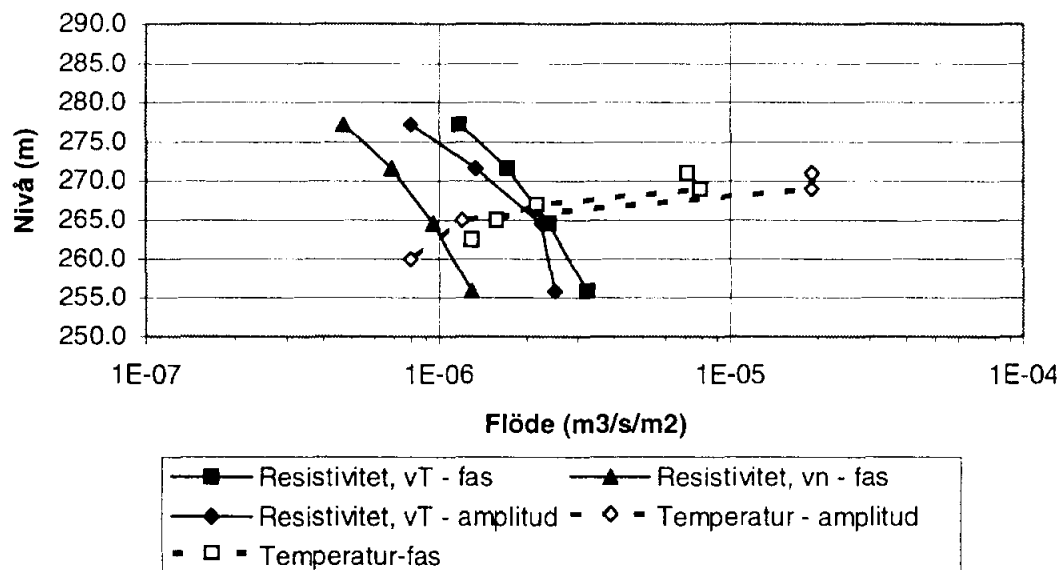
Resultatet kan jämföras med temperaturmätningarna som utförs i mätrör 13. Mätröret är beläget i dammens nedströmsfilter i den del av dammen som är grundlagd på jord. Eftersom tätkärnan i detta parti är lutande kan inte direkta jämförelser göras för specifika nivåer.

Temperaturmätningarna i mätrör 13, sektion 0/097, ger dock ett högre flöde, speciellt på djupet ca 20 m. Där finns en koncentrerad zon med 1–2 m höjd med markant förhöjd vattenströmning, jfr figur 6.4. Vattenströmningen i denna zon har utvärderats till ca $8\text{--}19 \text{ ml/s/m}^2$, dvs ca 10 ggr högre flöde än det som erhöles vid utvärdering av resistivitetsmätningarna. Eftersom upplösningen i vertikalled är högre med temperaturmätningar än med resistivitetsmätningar är det rimligt att avvikelserna kan bli av denna storleksordning. Dessutom bör noteras att de glesare resistivitetsmätningarna medför att det verkliga flödet underskattas. Det bör också noteras att grundvattenytan är lägre på dammens nedströmssida vilket innebär att flödet per ytenhet är större.



Figur 6.4. Sammanställning av temperaturmätningar 1994, Lövöns kraftverk.

Tyvärr är denna sektion den enda i vilken både temperatur- och resistivitetsmätningar utförs. Några ytterligare jämförelser har därför ej kunnat göras. Resultaten från de olika mätmetoderna och utvärderingsmodellerna visar dock god överensstämmelse, speciellt med tanke på det låga flödet, vilket framgår av figur 6.5, sidan 30.



Figur 6.5. Sammanställning av utvärderade flöden i sektion 0/100 vid Lövöns kraftverk.

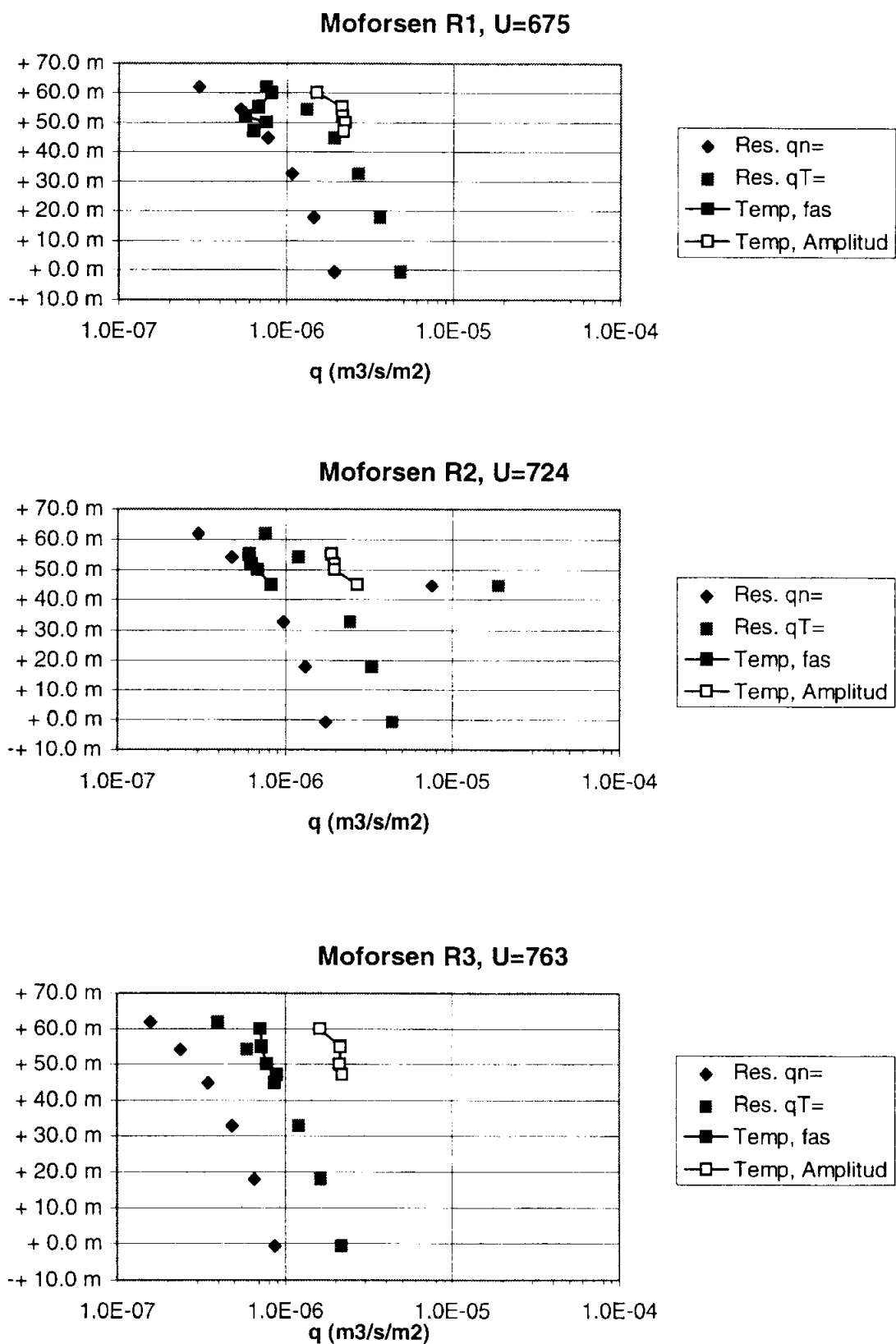
6.5. Utvärdering av mätningarna vid Moforsen

Mätningarna vid Moforsen har tyvärr ej samma frekvens eller mätkvalitet som mätningarna vid Lövön. Som ovan nämnts har endast de fyra senaste mätningarna givit tillräckligt gott underlag för tolkning. Eftersom mätningarna endast utförts under en del av året försvåras uttolkning av resistivitetsens medel-, max- och minvärde. Därför har vissa värden fått extrapoleras för att kunna göra en utvärdering av fasförskjutningen.

Någon utvärderingen av amplituden har ej gjorts eftersom den normerade resistivitetsvariationen är större än 1. Detta är i princip möjligt att erhålla värden som är större än 1, eftersom de båda transportprocesserna kan samverka. Amplitudmetodens förutsättningar är då ej uppfyllda. Likaså bör beaktas att modellresidualerna var betydligt högre för Moforsen än för Lövön. Det finns således fler möjliga felkällor, vilka kan bidra till att den normerade resistivitetsvariationen blir större än 1.

Vid utvärderingen av fasförskjutningen är detta ej lika känsligt eftersom felen är likartade för de olika mättillfällena. Max- och minpunkter bör därför vara säkrare att utvärdera även om de beräknade resistiviteter har ett relativt stort fel. Eftersom endast fyra mätningarna har utförts är det svårt att upptäcka skillnader i fasförskjutningen för olika nivåer. Det innebär att det utvärderade flödet ökar med ökande djup, vilket ej behöver vara sant i verkligheten.

Temperaturmätningar utförs månadsvis i tre mätrör, R1 (U=675), R2 (U=724) och R3 (U=763), varför utvärderingen koncentrerats till dessa sektioner. Temperaturmätningarna, vilka utvärderas i annat projekt, visar att variationerna ökar mot djupet i R1 och R2. Tyvärr är mätrören endast ca 30 m djupa varför inga resultat finns under +45 m. Förmodligen är därför vattenströmningen högre under denna nivå, vilket indikeras av de geologiska förhållandena. Generellt visar dock temperaturmätningarna att tät kärnan är homogen.



Figur 6.6. Utvärdering av vattenströmning i rör R1, R2 och R3 enligt olika utvärderingsmetoder.

Utvärdering av resistivitetsmätningarna visar att vattenströmningen är ca 1 ml/s/m^2 i rör R1 och R2 mot ca hälften vid rör R3, jfr figur 6.6, sidan 31. Utvärderingen av temperaturmätningarna visar att flödet för alla rören är ca 1 ml/s/m^2 . Samma resultat fås även för resistivitetsmätningarna för rör R1 och R2 medan flödet i R3 blir ca hälften så stort enligt resistivitetsmätningarna. Överensstämmelsen mellan de båda mätmetoderna och de fyra oberoende utvärderingsmodellerna är god och detektionsgränsen är lägre än 1 ml/s/m^2 , vilket ungefärligen motsvarar $K = 10^{-6} \text{ m/s}$.

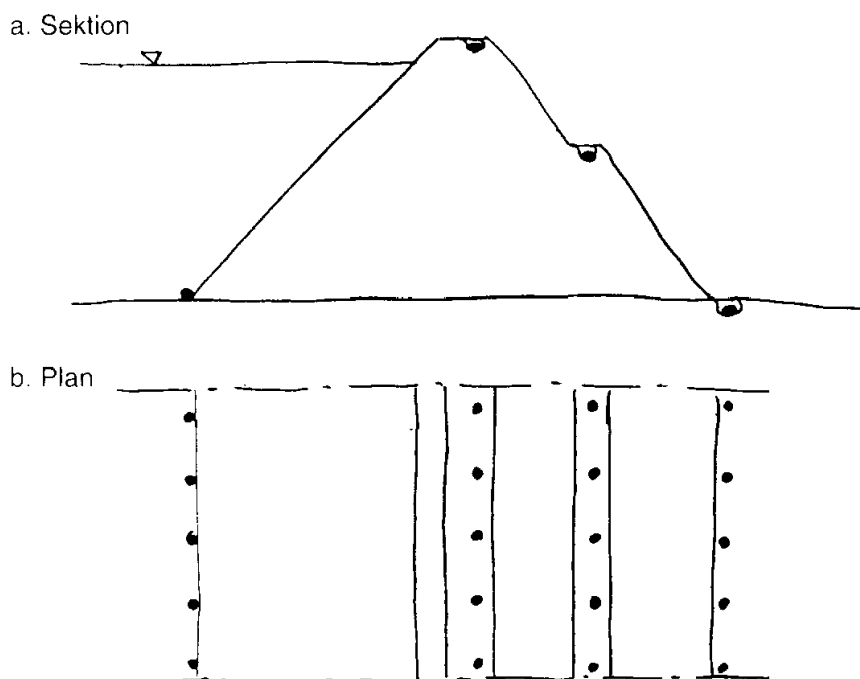
Intressant att notera är den antydning till förhöjt flöde under nivån +45 i rör R2 som temperaturmätningarna visar. Denna motsvaras av en kraftig diskontinuitet i resistivitetsmätningarna på samma nivå.

Liknande utvärderingar kan göras för de olika mätsektionerna. Om kontinuerliga mätdata finns tillgängliga är det möjligt att utvärdera totalflödet i hela mätsektionerna och jämföra dem. På så sätt skulle ytterligare en kontroll av utvärderingmetodiken kunna göras.

7. POTENTIAL OCH FORTSATTA ARBETEN

Resultaten från både Lövön och Moforsen visar en tydlig potential för att få resultat som är användbara för övervakning och i viss mån för tillståndskontroll av jorrdammar. Metoden bedöms kunna bli ett bra komplement till befintliga flödesmätningar, samt inte minst, även kunna användas där insamling av läckagevatten är ej möjligt eller kostsamt. Kompletta mätsystem, inkluderande datorbaserade analys- och tolkningsprogram behöver tas fram, för att mätsystemet ska bli operationellt. Fördelarna jämfört med befintliga system bedöms vara både högre känslighet och upplösning.

Mätning från dammkrönet synes vara en användbar strategi vid långsträckta dammar, typ Lövön. En mätsektion torde kunna vara tillräcklig för denna tillämpning, även om en mera omfattande mätstrategi skulle kunna öka tillförlitligheten. Vid kortare dammar med förhållandevis hög höjd är mätningarna svårare, varför andra mätkonfigurationer och tolkningsstrategier bör utvecklas. En praktisk begränsning rörande befintliga dammar är att de möjliga elektrodplaceringarna med markelektroder ofta inskränker sig till dammkrön, eventuella terrasser samt nedströms dammen.



Figur 7.1. Skiss visande tänkbar elektrodplacering på dammar som är korta relativt höjden (överdriven höjdskala): a. sektion, b. plan.

Exemplet Moforsen visar på de praktiska svårigheter som kan vara förknippade med att få tillräcklig upplösning vid mätningarna. Mätning mellan elektroder på olika sidor av dammen torde vara en bättre strategi vid korta höga dammar, d v s en typ av tomografiska mätningar med elektroder som i möjligaste mån omger dammen. Detta skulle kunna ske genom att placera elektroder inte endast på dammkrön, terrasser och nedströms dammen, men också i magasinet på uppströmssidan, se skiss i figur 7.1. Vidare vore det önskvärt med elektroder i borrhål och/eller tunnlar under dammen. Eftersom borrhålen oftast har foderrör av stål är det osäkert om dessa kan användas eftersom de kan störa mätningarna.

En vidareutveckling av datainsamlingstekniken för snabbare och effektivare mätning skulle ge praktisk möjlighet att samla in mera "kompleta dataset", och göra reciprokmätning för att få god kontroll över datakvaliteten. Detta är viktigt för att kunna dra ut så mycket som möjligt ur data, men har ej varit praktiskt möjligt i detta projekt.

Modellering och praktiska försök med tomografiska mätningar skulle kunna ge nyttiga erfarenheter av metodens praktiska potential och begränsningar.

Vidareutveckling av numerisk modellering och invers modelltolkning är en förutsättning för att kunna tolka de stora tredimensionella datamängder man skulle samla in enligt ovan skisserade principer. För närvarande pågår en kraftig utveckling på detta område, vilket även underlättas av den snabba utvecklingen på datorsidan. Förbättrade tolkningsprogram kan användas för att göra känslighetsanalyser för olika parametrar. Viktiga frågor att belysa är dessutom inverkan av 3D-effekter vid 2D-undersökningar, påverkan från jordledningarna och liknande installationer samt praktisk tillämpbarhet av 3D-undersökning.

Utvärderingsmetodiken för kvantifiering av vattenströmningen kan också utvecklas vidare. Om data finns från kontinuerliga mätningar kan det ge ökad förståelse för den komplicerade transportprocessen. Avgränsade laboratorieförsök skulle här kunna ge värdefull information och förståelse.

8. SLUTSATSER

Mätningarna har visat att mätbara resistivitetsvariationer förekommer i dammarna vid Lövön och Moforsen. Variationerna kan till stor del sägas vara flödesberoende. Den använda mät- och utvärderingsmetoden kan därför användas för att studera vattenströmningen genom fyllningsdammar.

Genom tolkning av uppmätta resistivitetsdata kan vattenströmningen lokaliseras och till viss del även kvantifieras. Oberoende jämförelser av mätresultatet har gjorts genom de olika utvärderingsmodeller som framtagits. Därigenom har påverkan av olika antaganden och teoretiska modeller belysts. För att ytterligare verifiera metodens noggrannhet och känslighet vore det önskvärt att göra kontinuerliga mätningar samt att kunna göra fler jämförelser med resultat från andra metoder.

För närvarande syns metoden mest vara tillämplig för längre dammar. Vid korta och höga dammar blir både mätningarna och tolkningen mer komplicerad, varför mer avancerad metodik måste tillgripas. Metoden bör därför utvecklas vidare även för sådana dammar. Det finns också behov av vidareutveckling och utvärdering av tolkningsmetodiken för resistivitetsmätningarna, där inverkan av exempelvis 3D-effekter och olika störningskällor belyses.

Enstaka resistivitetsmätningar bör ej utföras på dammar eftersom resultatet påverkas av de årstidsberoende variationerna av temperatur och konduktivitet i magasinet. Viss information kan givetvis erhållas, men tolkningen blir osäker. Upprepade årsvisa mätningar, vid likartade förhållanden, kan däremot vara värdefulla eftersom mätresultatet kan jämföras år från år. Metodens primära tillämpning är dock övervakning av dammar där kontinuerliga mätningar önskas, vilket också underlättar tolkningen.

Mätresultatet har jämförts med resultat som erhållits från temperaturmätningar. Mot bakgrund av de låga flöden som erhållits, några ml/s/m², är överensstämmelsen god. Den låga detektionsgränsen (vilken motsvarar ungefär $K = 10^{-6}$ m/s) innebär att eventuell pågående inre erosion bör kunna upptäckas i ett tidigt skede. Genom att metoden är icke förstörande kan även förloppets utveckling i tiden följas.

För att utvärderingsmetodernas tillförlitlighet bättre ska kunna bedömas erfordras kontinuerliga mätningar. Dessutom måste en modell tas fram där resistivitetspåverkan av både temperatur och joninnehåll beaktas. För att sedan bättre verifiera mät- och utvärderingsmetodiken erfordras fler referenshål för exempelvis temperaturmätningar.

9. REFERENSER

ICOLD (1983) *Deterioration of dams and reservoirs*. Paris 1983. ISBN 2-86812-001-6.

ICOLD (1995) *Dam failures statistical analyses*, Bullentin 99. Paris 1995. ISSN 0534-8293.

Barker, R. (1992) *A simple algorithm for electrical imaging of the subsurface*, First Break, vol 10, no 2, p 53-62.

Bear, J. (1979) *Hydraulics of Groundwater*, McGraw-Hill, ISBN 0-07-004170-9.

Claesson, J., m fl. (1985) *Markvärme – En handbok om termiska analyser*, Statens råd för byggnadsforskning T17:1985, Stockholm. ISBN 91-540-4463-4.

Claesson J., Hellström, G., Johansson, S. (1995) *Temperature analyses for evaluation of water flow in aquifers and embankment dams*. (Prelimiär titel för publicering under 1995)

Corwin, R.F. (1990) *The self-potential method for environmental and engineering applications*, in Investigations in Geophysics no. 5 vol I: Review and Tutorial, ed. S. Ward, Society of Exploration Geophysists, Tulsa, p 127-145.

Dahlin, T. (1993) *On the Automation of 2D Resistivity Surveying for Engineering and Environmental Applications*, doktorsavhandling, ISRN LUTVDG/TVDG—1007—SE. ISBN 91-628-1032-4, Lunds Tekniska Högskola, p 187.

Johansson, S. (1990) *Detektering och kvantifiering av vattenläckage i jord- och stenfyllningsdammar genom temperaturmätningar*, KTH, Vattenbyggnad Report No 45, Stockholm 1990.

Johansson, S. (1991) *Localization and quantification of water leakage in ageing embankment dams by regular temperature measurements*, in Procs. ICOLD 17th Congress, Vienna, Q65.R54, p 991-1005.

Johansson, S., Claesson J., Hellström, G. (1995) *Seepage evaluation in embankment dams by temperature measurements*. (Prelimiär titel för publicering under 1995).

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

Loke, M.H. och Barker, R.D. (1994) *Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections*, Extended Abstracts of Papers 56th EAEG Meeting Vienna, Austria 6-10 June 1994, I002.

Merkler, G.P., Milizer, H., Hötzl, H., Armbruster, H. och Brauns, J. (Eds.) (1989) *Detection of Subsurface Flow Phenomena*, Springer-Verlag, 514p.

Nilsson, Åke (1995) *Beprövade metoder för tillståndskontroll av fyllningsdammar*. VASO dammkommittés rapport nr 20, Stockholm, ISSN 1400-7827.

Overmeeren, R.A. van och Ritsema, I.L. (1988) *Continuous vertical electrical sounding*, First Break, vol 6, no 10, p 313-324.

Parasnis, D.S. (1986) *Principles of applied geophysics*, 4:th ed, Chapman and Hall, London, 402p.

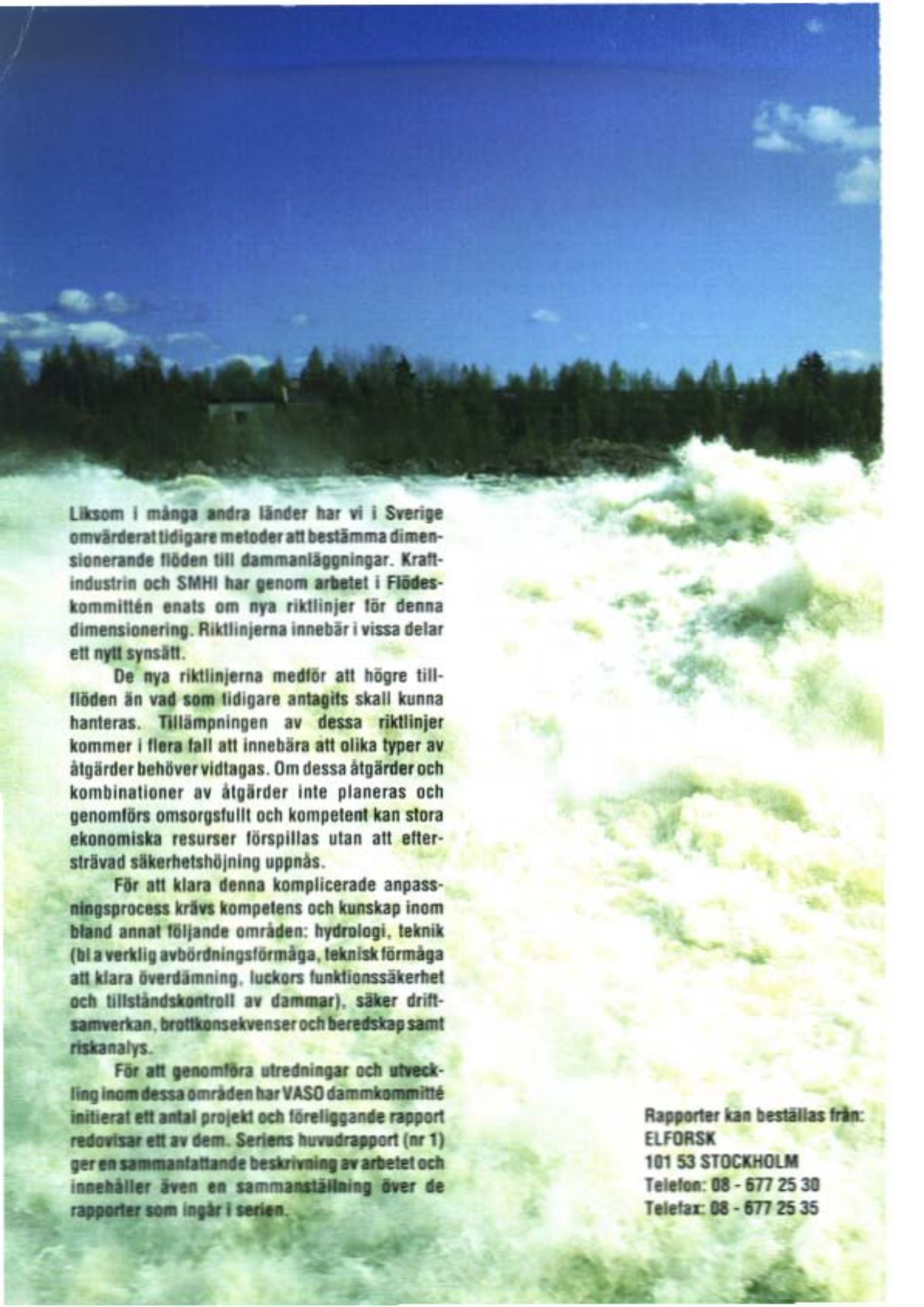
Petiau, G. och Dupuis, A. (1980) *Noise, temperature coefficient and long time stability of electrodes for telluric observations*, Geophysical Prospecting, vol 17, p 792-804.

Polubarinova-Koshina, P. (1962), *Theory of Ground Water Movement*. New Jersey: Printon Univeristy press.

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

Skoog, U. och Nilsson, P.-O. (1995) *Elektriska mätningar för tillståndskontroll och övervakning av jorddammar*, examensarbete, Lunds Tekniska Högskola, ISRN: LUTVDG/TVTG-5045-SE, 44p.

Triumf, C-A, Thunched, H., Enström, A. (1995) *Övervakning av tät kärnans funktion genom mätning av självpotential och resistivitet*, VASO dammkommittés rapport nr 23, Stockholm, ISSN 1400-7827.



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

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

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

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

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