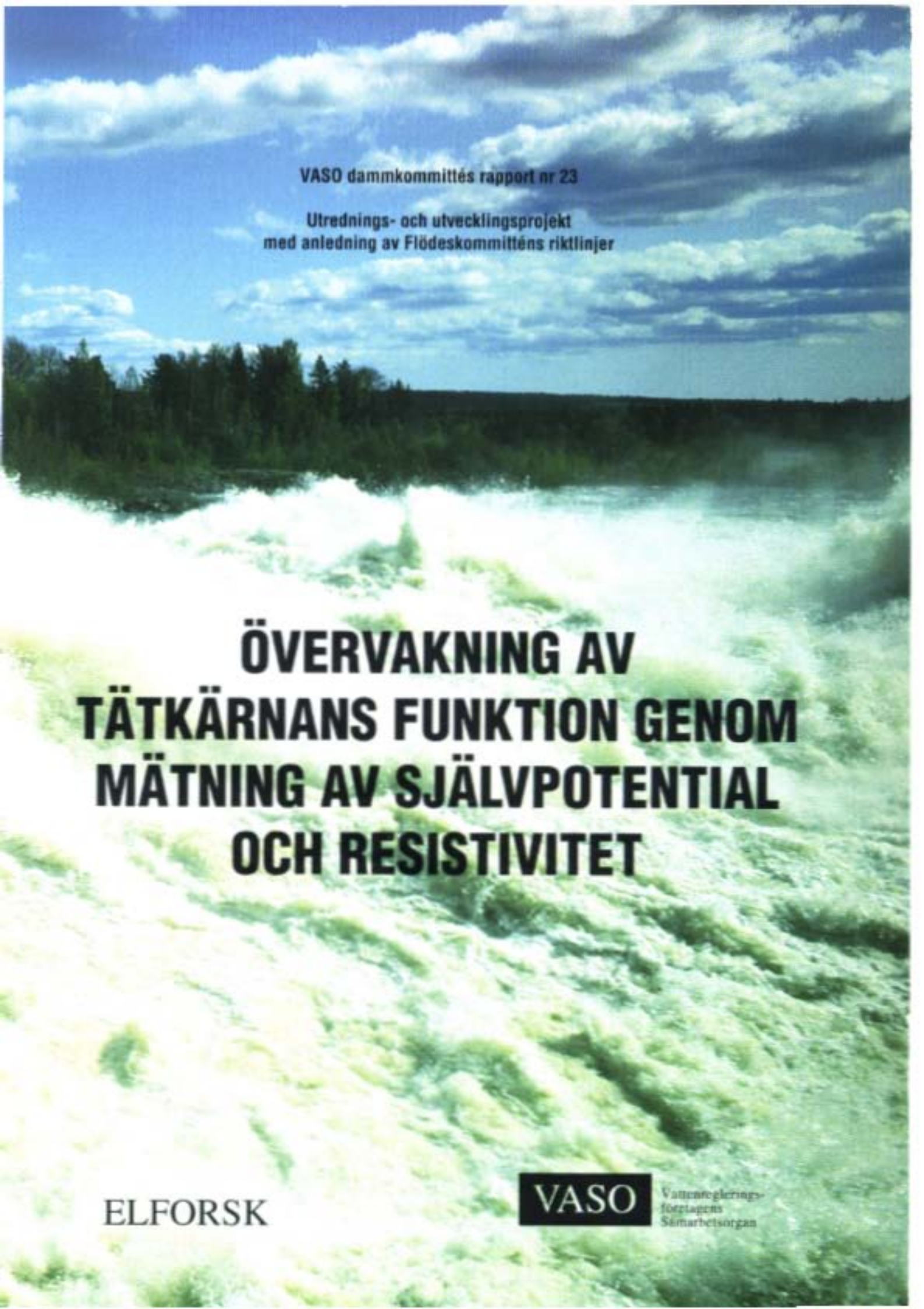




VASO dammkommittés rapport nr 23

Utrednings- och utvecklingsprojekt
med anledning av Flödeskommitténs riktlinjer

ÖVERVAKNING AV TÄTKÄRNANS FUNKTION GENOM MÄTNING AV SJÄLVPOTENTIAL OCH RESISTIVITET

ELFORSK

VASO

Vattenreglerings-
företagens
Samarbetsorgan

VASO dammkommittés rapport nr 23

Utrednings- och utvecklingsprojekt
med anledning av Flödeskommitténs riktlinjer

ÖVERVAKNING AV TÄTKÄRNANS FUNKTION GENOM MÄTNING AV SJÄLVPOTENTIAL OCH RESISTIVITET

Carl-Axel Triumf, Triumf Geophysics AB
Hans Thunehed, Högskolan i Luleå, Avd. för tillämpad geofysik
Arne Enström, Högskolan i Luleå, Avd. för tillämpad geofysik

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

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

FÖRORD	i
SAMMANFATTNING	ii
SUMMARY	iv
1. INLEDNING	1
2. MÄTSYSTEM OCH MÄTTEKNIK	2
2.1. Teknisk beskrivning av mätsystemet på Suorvadammen	2
2.2. Mättekniken i korthet	4
3. DAMMEN OCH DESS MILJÖ	6
4. DATAKVALITET	10
4.1. SP-data	10
4.2. Resistivitetsdata	10
5. DATABEARBETNING, ANALYS- OCH TOLKNINGSMETODIK	11
5.1. Databearbetning	11
5.2. Analysmetodik	11
6. SJÄLVPOTENTIALMÄTNINGAR	13
6.1. Allmänt	13
6.2. Variation i SP under året till följd av vattenstånds- förändringar i magasinet	13
6.3. SP-anomalier som indikerar utströmningsområden	16
6.4. SP-anomalier och deras koppling till skrot	17
6.5. SP-anomalier inducerade av regn	20
6.6. Telluriska fält och deras inverkan på SP-data	20
7. RESISTIVITETSMÄTNINGAR	24
7.1. Allmänt	24
7.2. Temperaturer i dammen och dess inverkan på resistiviteten	24
7.3. Resistivitetsens koppling till vattenståndet i magasinet, lufttemperatur och fuktighet i stödfyllning	24
7.4. Slutsatser om dammkroppens homogenitet	25
7.5. Resistivitetsdata som stöd för tolkning av SP-data	27
8. AVBROTT OCH STÖRNINGAR	28
9. SLUTSATSER	29
10. REFERENSER	31
11. APPENDIX	33

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 Carl-Axel Triumf, Triumf Geophysics AB samt Hans Thunehed och Arne Enström, Högskolan i Luleå, avd. för tillämpad geofysik. I projektets referensgrupp har ingått Sten Lasu – Kraftverksföreningen, Sam Johansson – KTH samt Benny Johansson, John-Edwin Sandell och Malte Cederström – Vattenfall Vattenkraft. Ansvarigt ombud för beställaren har varit Urban Norstedt – Vattenfall Vattenkraft.

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 en damm studerat möjligheter att övervaka tåtkärnans funktion genom mätning av dels självpotential, dels resistivitet. Resultatet av speciellt självpotentialmätningarna verkar lovande.

VASO dammkommitté

SAMMANFATTNING

Inre erosion i fyllningsdammar är orsak till mellan en tredjedel och hälften av alla dammbrott. Möjligheterna att tidigt detektera inre erosion genom mätningar med elektriska metoder på dammkroppen bedöms som goda, vilket motiverar utveckling av adekvat mät- och analysteknik. Ett utvecklingsprojekt för detta, som i huvudsak finansierats av Norrbottens Forskningsråd och Elforsk AB, har pågått sedan 1992. Projektet har drivits i samarbete mellan Högskolan i Luleå, Avdelningen för tillämpad geofysik och Triumph Geophysics AB i Luleå och har haft som målsättning att:

- Utveckla en prototyp för kontinuerlig självpotential- och resistivitetsmätning på en stor damm.
- Installera, prova och igångsätta systemet.
- Utföra mätningar under ett år.
- Utarbeta analysteknik för de data som insamlats.

Under 1993 utvecklades mätsystemet varefter det installerades på en av dammarna i Suorva, där självpotential- och resistivitetsmätningar pågått sedan augusti 1993. Mätsystemet är fullständigt automatiserat vad beträffar mätning. Mätparametrar kan varieras per modem. Datakvalitet kan kontrolleras och viss feldiagnostik ställas utan fysisk närvaro på dammen. Endast reparationer av fysiska skador på instrumenteringen kräver besök på plats.

Fördelar med systemet är att mätningar kan utföras med stor täthet i tid och rum. Systemdesign och komponentval ger vidare stor flexibilitet vad gäller anpassning till de lokala förutsättningarna på olika dammar.

Driftsäkerheten hos den utvecklade och installerade prototypen har varit god. Datakvaliteten under den tjälfria delen av året har varit mycket god. Under den tjälade perioden har den dock varit nedsatt, främst i resistivitetsdata då majoriteten av strömelektroderna ej förmått utsända tillräckligt stark ström.

Mätserien visar att dammen reagerar som väntat på variationer i magasinsnivå, dvs en mätbar strömningspotential uppkommer i dammkroppen till följd av vattenströmning genom densamma. Förutsättningen för identifikation av strömningsvariationer genom dammkroppen finns därför. Tolkningen av SP-data ger 4 områden med avvikande strömningspotential vilka iakttagits under hela projektiden. Anomalierna tolkas indikera inhomogeniteter i vattenströmning genom dammkroppen. Under vintern 93/94 tolkas ytterligare ett område med anomal strömning ha tillkommit. Ett tänkbart sätt att undersöka om dessa zoner kan vara utsatta för inre erosion är att kontrollera om zetapotentialet i dessa förändras med tiden.

En studie av SP-anomaliers koppling till metallskrot visar att skrot generellt endast framkallar relativt små anomalier. En kraftig negativ SP-anomali i den centrala delen av dammen har dock sin övre källa på ringa djup under dammytan, varför det inte kan uteslutas att den är orsakad av metallskrot.

Resistivitetsdata på den studerade dammen påverkas av för många variabler för att inverkan av någon enskild skall kunna identifieras entydigt. Inget av de områden med inhomogen strömning som indikerats av SP-mätningarna, har hittills kunnat spåras entydigt i resistivitetsdata.

I den ursprungliga projektformuleringen avsågs att basera analysen av data på statistisk analys, med grund i dammens respons för vattenståndscykler. Sommaren 1993 var emellertid extremt regnrik och sommaren 1994 extremt regnfattig, vilket fick till följd att en full vattenståndscykel ej erhöles. Detta har försvårat analysen av resistivitetsdata.

Bra modelleringsverktyg både för SP- och resistivitetsdata krävs. Vidare krävs bättre kunskap om de fysikaliska egenskaperna hos dammar, dvs indata till modellerna. Detta möjliggör analyser av kvantitativ karaktär i större grad än vad som utförts i detta projekt. På Högskolan i Luleå pågår kvantifiering av parametrar relaterade till strömningspotential i bl a moräner (Friborg, 1995). Även studier av tät kärnans resistivetsreaktion på förändringar i vattentemperatur och vattnets joninnehåll bör utföras i laboratoriemiljö.

SUMMARY

Internal erosion in embankment dams is a common cause of dam failures. The use of geophysics in the mapping of electrical phenomena and also the monitoring of changes in parameters addressing geoelectrical methods is considered to be a technique with high potential of detecting inhomogenities at the dam core which later may lead to fatal internal erosion.

A project started in 1992 with the principal aim to develop a prototype for a dam monitoring system based on frequent measurements at many points of the apparent resistivity and self-potential of a dam.

The system was developed and installed in the Suorva dam in 1993, where measurements have been carried out since August 1993.

The system carries out these measurements automatically. Communication with the system is maintained via modem. For example this allows a distant setting of parameters for the data acquisition and also a distant error diagnosis.

In general the data quality has been satisfactory. During the period with unfrozen ground (May-October) the data quality has been very good. However, frozen ground during the winter has prevented the injection of a current strong enough to maintain good signal to noise ratios, hampering effective resistivity surveys.

Self-potential measurements show that a streaming potential is developed within the dam, thus enabling studies of the homogeneity in seepage and changes in zeta-potential with time.

The results show four (possibly five) sections in the dam where anomalous behaviour in the self-potential is recognized and interpreted as inhomogeneous seepage.

The resistivity data from this dam are difficult to interpret as several different sources for resistivity variations probably interact. The problems are emphasized due to lack of resistivity monitoring of a closed cycle in water levels where there is a hiatus of 10 m.

1. INLEDNING

I Sverige finns många dammar av varierande storlek och ålder, där cirka 140 utgör höga dammar. Enligt Sowers (1977) har inre erosion av tät kärnan orsakat ungefär hälften av dammbrotten i höga dammar (>15 m), medan motsvarande andel för lägre dammar är cirka en tredjedel. Att utveckla teknik för övervakning av tät kärnan i fyllningsdamm är därför motiverad. Sådan utveckling stöds bl a av Elforsk AB och Norrbottens Forskningsråd, vilket resulterat i genomförandet av detta projekt.

Målsättningen har varit att utveckla, installera och driva ett system för kontinuerlig mätning av självpotential och resistivitet på en fyllningsdamm. Projektet innehåller också en analysfas som syftar till att studera förändringar i självpotential och resistivitet. Sådana förändringar förväntas bl a indikera förändringar i vattenströmning genom tät kärnan vilket därmed ger en potential att upptäcka pågående inre erosion.

Inom denna serie av VASO-projekt har vidare en genomgång av nya metoder för övervakning och undersökning av fyllningsdamm gjorts (Johansson et al, 1995).

När en vätska flyter genom ett poröst medium bildas en elektrisk potential, även kallad strömningspotential, genom sk elektrokinetisk koppling (MacInnes, 1961; Nourbehecht, 1963). Potentialskillnaderna som orsakas av vätskeflödena kan uppmätas på markytan över flödesvägarna. I slutet av 1960-talet publicerades ett arbete som visade hur flödespotentialen (ofta också kallad för självpotential, vilket egentligen är ett samlingsnamn för potentialfält där man ej lyckats bestämma störningsorsaken) praktiskt kunde användas vid studier av vattenreservoarer och dammkroppar (Ogilvy et al, 1969). Arbetet följdes av fler studier gällande uppkomst och mätning av självpotentialfält (Bogoslovsky, V. A., 1970; Corwin och Hoover, 1979; Ernstson och Scherer, 1986; Merkler et al, 1989; Wilt och Corwin, 1988; Corwin, 1988a och b).

Den elektriska resistiviteten i dammkroppen bestäms bl a av vattenhalten i tät kärna och stödfyllning. Dessutom inverkar porvattnets temperatur och elektriska resistivitet och resistiviteten hos de enskilda mineralkornen/bergartsfragmenten i dammkroppen. Exempel finns i litteraturen på hur resistivitetsmätningar använts för studier av dammkroppar (Arandjelović, 1986). Parallellt med vårt utvecklingsprojekt pågår ett av VASO finansierat forskningsprojekt av hur temperaturkorrigerade resistivitetsmätningar kan användas vid övervakning av dammar (Johansson och Dahlin, 1994).

En kombinerad mätning av självpotential och resistivitet på en dammkropp har förutsättningar att detektera förändringar i vattenflödet genom dammkroppen; dels naturliga förändringarna till följd av variationer i magasinshöjd, dels förändringar som kan vara orsakade av pågående inre erosion. I fullskala har veterligen ej rapporterats kontinuerliga täta mätningar under en hel årscykel. För genomförandet av en årscykelmätning har utrustning och mätteknik för automatisk mätning med täta intervall, på en stor dammkropp utvecklats. Mätning har pågått sedan augusti 1993 på en av Suorvadamarna i Lule älvs vattensystem. Resultaten från projektet redovisas nu i denna slutrapport.

2. MÄTSYSTEM OCH MÄTTEKNIK

2.1. Teknisk beskrivning av mätsystemet på Suorvadammen

Utveckling och tillverkning

I mätsystemet ingår komponenter och programvara som utvecklats och tillverkats av Högskolan i Luleå. Avdelningen för tillämpad geofysik. Till dessa hör allt inom mätsystemet exklusive kopplingsboxar, styrbox, samt till dessa specifikt kopplad programvara. Kopplingsboxarna, styrbox, samt till dessa specifikt kopplad programvara, har utvecklats, tillverkas och saluförs av ABEM AB i Stockholm under produktnamnet Multimac.

Huvudkomponenter i mätsystemet och mätteknik

Ett principalschema för mätsystemet redovisas i figur 2.1. Systemet innehåller komponenter som fysiskt återfinns i tre grupperingar:

- På dammen.
- I pegelhuset.
- Utanför dammen (i ett skogsparti några hundra meter från dammen).

På dammen

På dammen finns tre kabelslingor (dubbelledare) benämnda **a**, **m** och **n**. **a** är den slinga som innehåller strömelektroder, **m** och **n** innehåller potentialelektroder. Sammanlagt återfinns 45 potentialelektrodroppar på dammen (varje elektrodropp innehåller egentligen två potentialelektroder, varav en i reserv). Vidare finns 20 strömelektroder på dammen, varav 5 i inspektionsbrunnar på dammkrönet och resten i elektrodroppar. De 45 potentialelektroder och de 20 strömelektroder på dammen är anslutna via kopplingsboxar, till styrboxen i pegelhuset. Det sitter en kopplingsbox vid varje elektrod. Förutom ovanstående finns 5 termistorer installerade i 5 av potentialgroparna i dammen (dessa är ej markerade i figuren). Termistorerna kräver tvåpolig anslutning varför en extra enkelledare går till dessa.

I pegelhuset

I pegelhuset finns en styrbox som sköter i och urkoppling av olika elektroder. Styrboxen får sina order från datorn. Signalen från potentialelektroderna på slingorna m och n går in i var sin kanal till A/D-omvandlaren. Före inträdet i omvandlaren sker en andra ordningens lågpasfiltrering (10 Hz). Därefter sker A/D-omvandling med gemensamt områdesval. Omvandlingsfrekvensen är vald för att 50 Hz störningar skall ge minimal inverkan.

Potentialreferenselektroder (ref.pot. 1 och ref. pot. 2) och potentialelektroder för mätning av det telluriska fältet (tellurik N och tellurik E) är direkt anslutna via lågpasfilter till A/D-omvandlaren. De är alltså alltid ikopplade och styrs därför ej av styrboxen.

Strömsändaren i pegelhuset styrs av datorn, registrering av strömmens karakteristika sker via A/D-omvandlaren. Strömutsändning sker med en lågfrekvent fyrkantvågsändare som startas från datorn. Den fjärran strömreferenselektroden utanför dammen (för återledning av strömmen) är direkt ansluten till fyrkantvågsändaren. Styrboxen sköter om att koppla i och ur olika strömelektroder på dammkroppen.

Datorn styr och registrerar A/D-omvandlingen. Insamlade mätvärden filtreras och behandlas i datorn innan resultaten sparas på hårddisk. Till datorn är ett modem anslutet för att

möjliggöra kommunikation mellan Luleå och systemet i Suorva. Därigenom kan dels modifieringar av programvaran göras, dels data hämtas. Datorn tappas på data cirka var 14:e dag.

Utanför dammen

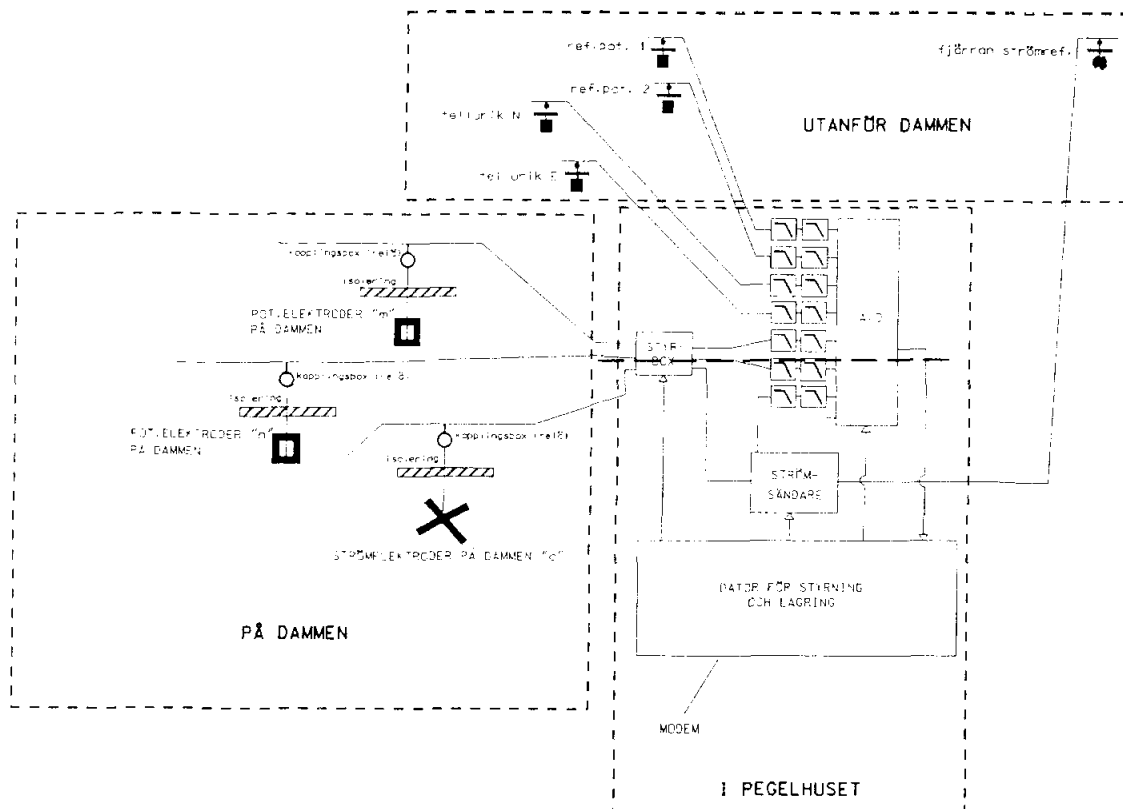
Något hundratal meter utanför dammen finns en grop med referenspotentialelektroder, ref.pot. 1 och 2. Vidare finns två potentialelektroder för mätning av det telluriska fältet i två riktningar, tellurik N och E. Dessutom finns en fjärran strömreferens-elektrod cirka 400 m uppströms dammen i en bäckravin.

Ström- och potentialelektroder samt deras installation

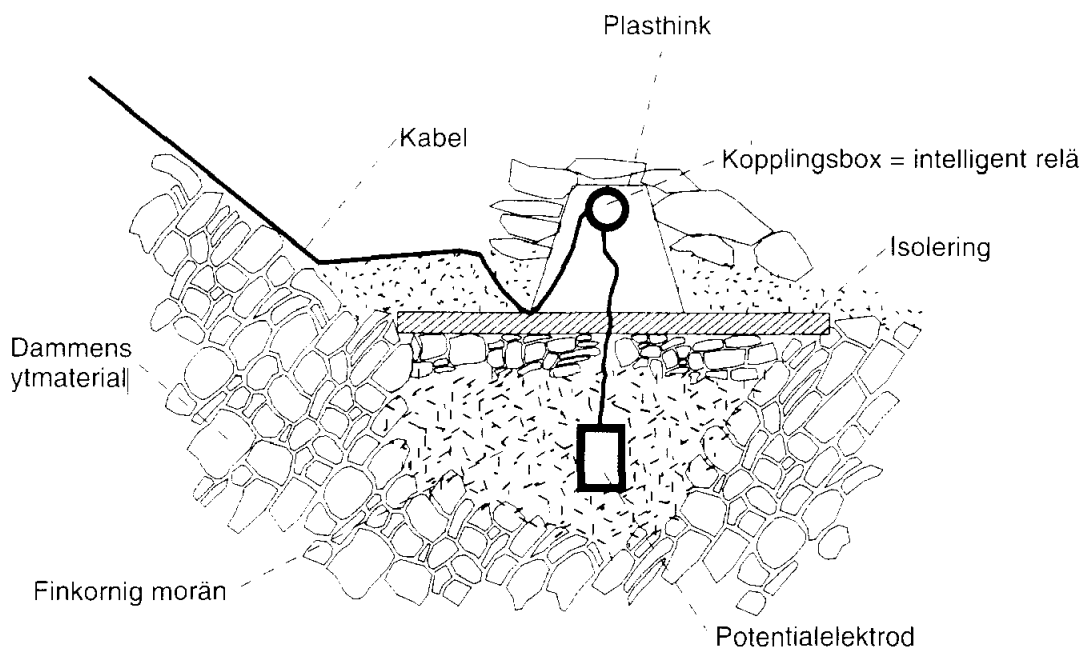
Strömelektroderna utgörs av 12 mm armeringsjärn och är cirka 80 cm långa. De är installerade dels i 5 inspektionsbrunnar på dammkrönet, dels i gropar på dammens nedströmssida.

Potentialelektroderna är av typen bly-blyklorid, ingjutna i plastbehållare. Gjutningen är gjord med gips vilken blandats i blykloridförande vatten. I gjutningen sitter en blyplåt med storlek 50 • 100 • 1 mm. Potentialelektroderna är cirka 145 • 65 mm stora, förutom referens-elektroderna, vilka är ungefär dubbelt så stora.

Samtliga elektrodgropar (exklusive inspektionsbrunnarna på krönet) är grävda med traktor-grävare ned till drygt 1 m djup. I groparna har därefter fyllts morän med hög finjordshalt, som körts till dammen från Jokkmokk. Elektroderna är placerade i moränmaterialet. Ovanpå har placerats ca 2 m² markisolering och över detta det uppgrävda dammaterialet.



Figur 2.1. Principskiss över mätsystemet.



Figur 2.2. Principskiss för elektrodinstallation.

Kabeln från elektroden är ansluten till den fjärrstyrda brytaren, som skyddas från nederbörd och annan åverkan med en plasthink. Hinken har därefter rörsatts in för att skyddas ytterligare, figur 2.2.

Kablar

Kablar på dammen har placerats så att risken för brott orsakade av människor och djur blir så liten som möjligt utan att kablarna skall behöva grävas ned. Detta för att minska arbetsinsatsen samt förenkla felsökning/reparation av eventuella kabelbrott. Dessutom är dammen egentligen avspärrat område, samtidigt som miljön på dammkroppen är steril, vilket knappast attraherar människor, renar och gnagare. Kablar från pegelhuset till referenselektroder och tellurikelektroder har däremot grävts ned eller dolts med mossor, eftersom skogsmiljön är mer besökt av djur och människor.

2.2. Mättekniken i korthet

Via datorn och omkopplingsboxen kopplas olika elektrodkonfigurationer eller någon av temperatursensorerna in för mätning.

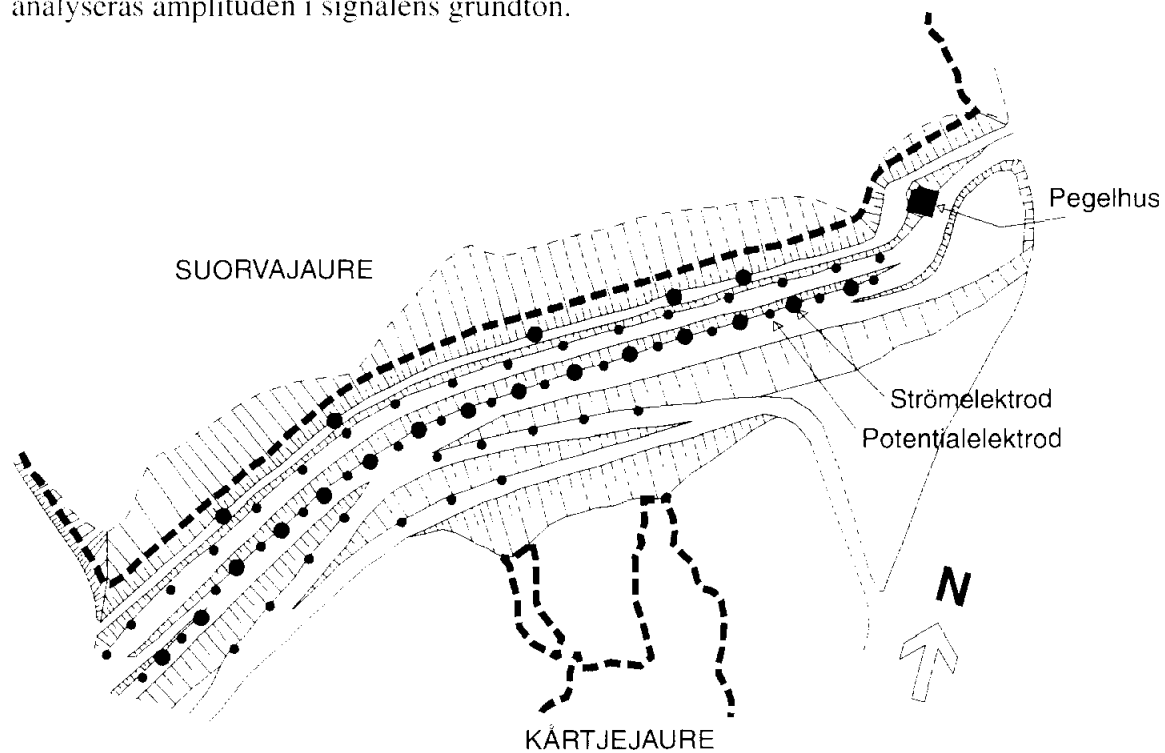
Mätning av självpotentialen sker i de 45 potenzialelektrodena på dammen, vars läge framgår av figur 2.3. Mätning sker 23 ggr per dygn relativt en av referenselektrodena. Mätning av resistiviteten på dammkroppen sker genom att olika kombinationer av en ström- och en potenzialelektrod kopplas in. Sammanlagt mäts 75 olika kombinationer en gång per dygn. Kombinationerna är valda så att strömmen bringas att dels flyta i olika riktningar genom tät kärnan, dels på olika djup. Några av kombinationerna redovisas i figur 2.4.

Innan en SP-mätning startar kopplas den aktuella elektroden in. Efter en stabiliserande väntetid börjar SP-mätningen. Val av väntetid har skett efter intrimningsmätningar. SP-

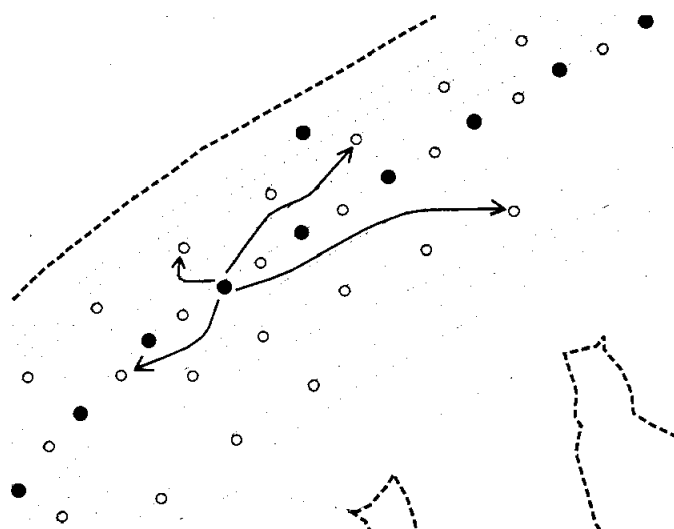
mätningen görs sedan i form av 200 registreringar under en tid av en sekund. Detta ger idealt en total undertryckning av signaler med 16,67, 50 och 100 Hz frekvens. Medelvärdet av dessa registreringar lagras på mät dator vid dammen.

Vid den vidare bearbetningen slås 23 sådana mätvärden ihop till ett dygnsmedelvärde. De två lägsta respektive högsta värdena kasseras dock. Förfarandet minskar inverkan av långperiodiska telluriska signaler och enstaka kraftigt störda registreringar.

Resistivitetsmätningarna sker med utsänd fyrkantvåg. Samplingsfrekvensen har anpassats till sändarens periodtid och är 183 Hz. 2048 mätvärden registreras och efter Fouriertransform analyseras amplituden i signalens grundton.



Figur 2.3. Elektrodsystemet på den Östra Suorvadammen.



Figur 2.4. Figuren visar hur en strömelektrod kan utsända ström för mätning mot fyra olika potentialelektroder. På så vis erhålls information från olika delvolymen i tätjärnan.

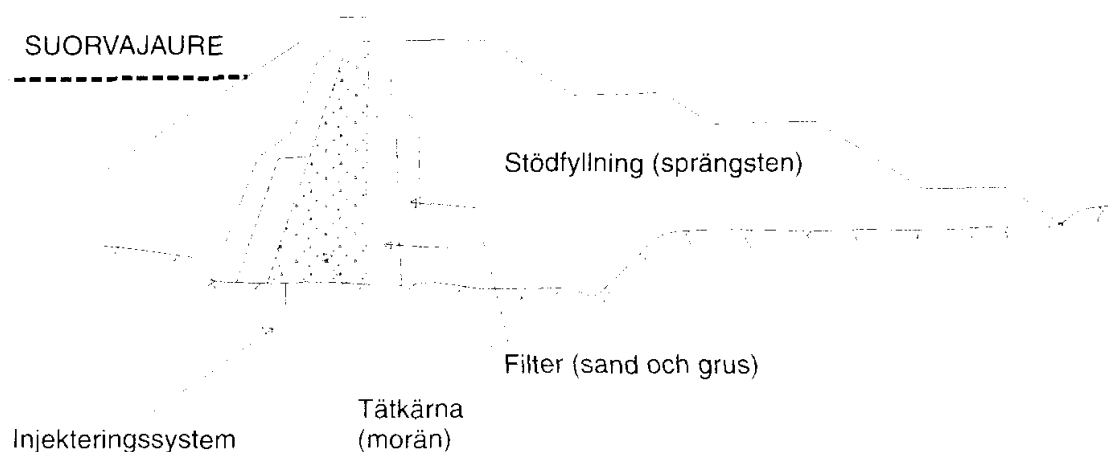
3. DAMMEN OCH DESS MILJÖ

Dammkroppen och dess läge

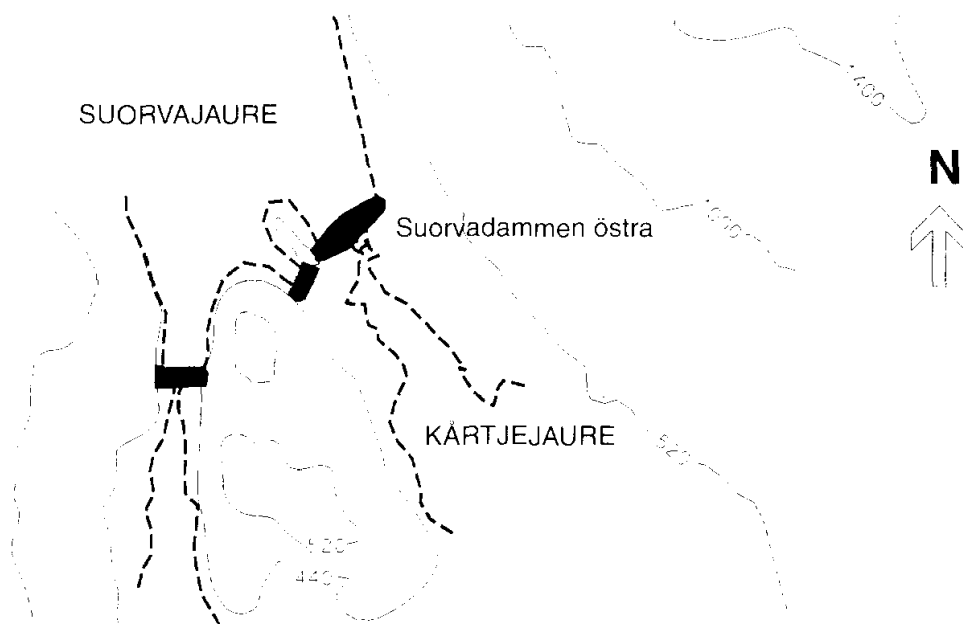
Mätsystemet har installerats på den Östra Suorvadammen som är cirka 600 m lång och drygt 40 m hög. Den är en fyllningsdamm med vertikal tätjärna av morän. Runt tätjärnan finns filter och längst ut en stödfyllning av sten och block, figur 3.1.

Den Östra Suorvadammen är belägen i en markerad dalgång och gränsar i öster mot Ritsemvägen. På denna sida finns högspänningsledningar och en fjällbrant. Mot syd och sydväst utbreder sig dalgången, där ytterligare två dammkroppar finns uppförda, figur 3.2.

På nedströmssidan finns terasser i vars innerkant elektroder placerats. Dels är innerkanten skyddad från trafik, dels ligger snön kvar här på den annars under vintern närmast barblåsta dammkroppen. Snön skyddar elektroder och kablar, samt dämpar temperaturvariationer.



Figur 3.1. Tvärsektion genom Östra Suorvadammen.



Figur 3.2. Suorvadammens läge. I den östra fjällslutningen finns en kraftledning inom 200 m från dammen, den har dock ej markerats. Läget av närliggande dammkroppar liksom höjdcurvor framgår.

Problem med inre erosion

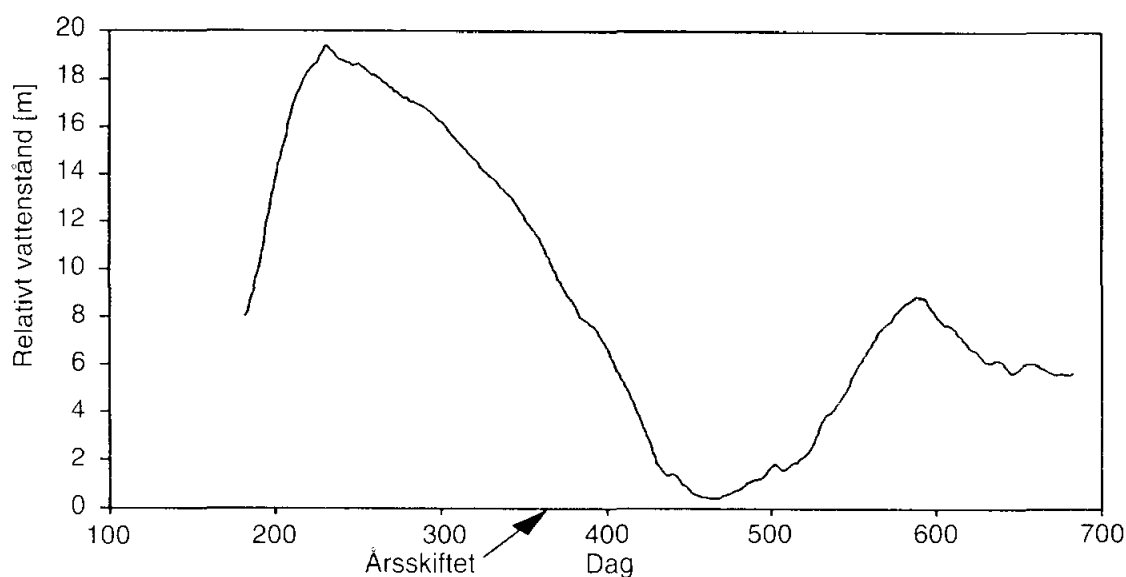
I den Östra Suorvadammen har tidvis förekommit problem med lokal inre erosion. Erosionen har främst manifesterats som insjunkningar på dammkrönet. Dammkrönet har därför varit föremål för flera studier och reparationsarbeten. Bl a har injekteringar utförts och tättkärnans övre delar blottats.

Installationer och skrot

I samband med tidigare problem med inre erosion har ett stort antal borrhål utförts i dammkroppen. I borrhålen sitter ofta foderrör av järn. Dessutom förekommer järnskrot här och var i stödfyllningen. Förekomst av foderrör och järnskrot har studerats med magnetiska mätningar och detaljerade SP-mätningar, för att om möjligt identifiera järninducerade SP-anomalier. Arbetet har utförts som ett examensarbete på Högskolan i Luleå av Olivier Grün (1994), vars sammanfattning presenteras i Appendix 1.

Vattenståndvariationer i magasinet

Den maximala regleringshöjden i Suorvamagasinet är 30 m. Under den tid som mätningar i detta projekt pågått har magasinsnivån varierat enligt figur 3.3. Sommaren 1994 var regnfattig i hela Sverige. Magasinsnivån 1994 låg därför cirka 10 m under motsvarande nivå i augusti 1993. Vår önskan att mätserien skulle täcka in en hel cykel med vattenståndsvariation uppfylldes därför inte.



Figur 3.3. Variationer i Suorvamagasinet vattennivå från dag 182 till dag 682.

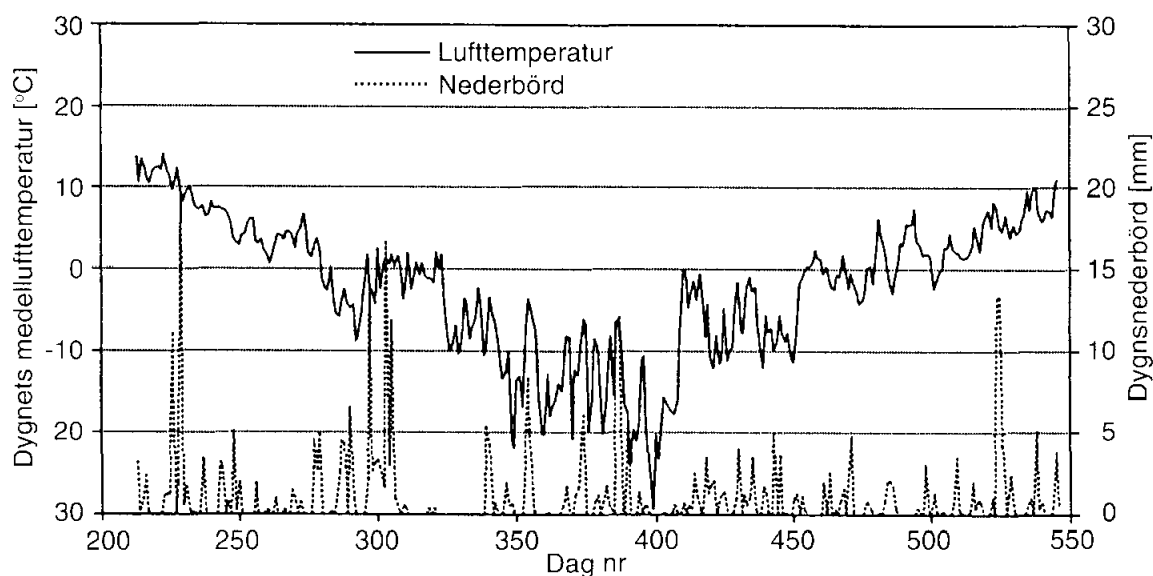
Klimat

Klimatet i Suorva är kärt. Temperaturen är ofta låg och vinden i regel stark. Temperatur- och nederbördsvariationer från väderstationen i Ritsem, som är belägen cirka 35 km från dammen, under knappt ett år (1 augusti 1993 – juni 1994), framgår av figur 3.4.

Snötäcket tjocklek framgår av figur 3.5. Snötäcket isolerande förmåga skyddar delvis elektrodena. På Suorvadammen är emellertid vinden stark, varför snötäcket i regel är tunt, förutom i innerkanterna av terrasserna. En jämförelse mellan lufttemperaturen och temperaturen nere i en elektrodgröp visar att markisolering inte skyddar effektivt i den steniga och porösa stödfyllningen, figur 3.6. Snötäcket tycks ha en effektivare isolerande förmåga.

Tabell 3.1. Suorvamagasinetts vattentemperatur och vattenkonduktivitet under perioden 4 oktober 1993 till 21 oktober 1994.

Datum	Vattnets temperatur [°C]	Vattnets resistivitet 18°C [ohmm]	Dag nr
1993-10-04	7,2	297	277
1993-10-20	4,9	208	293
1993-11-24	1,1	200	328
1994-03-10	0,9	327	434
1994-04-28	1,6	215	483
1994-06-16	2,9	169	532
1994-08-03	10,5	310	580
1994-08-24	10,4	340	601
1994-10-21	4,5	323	659



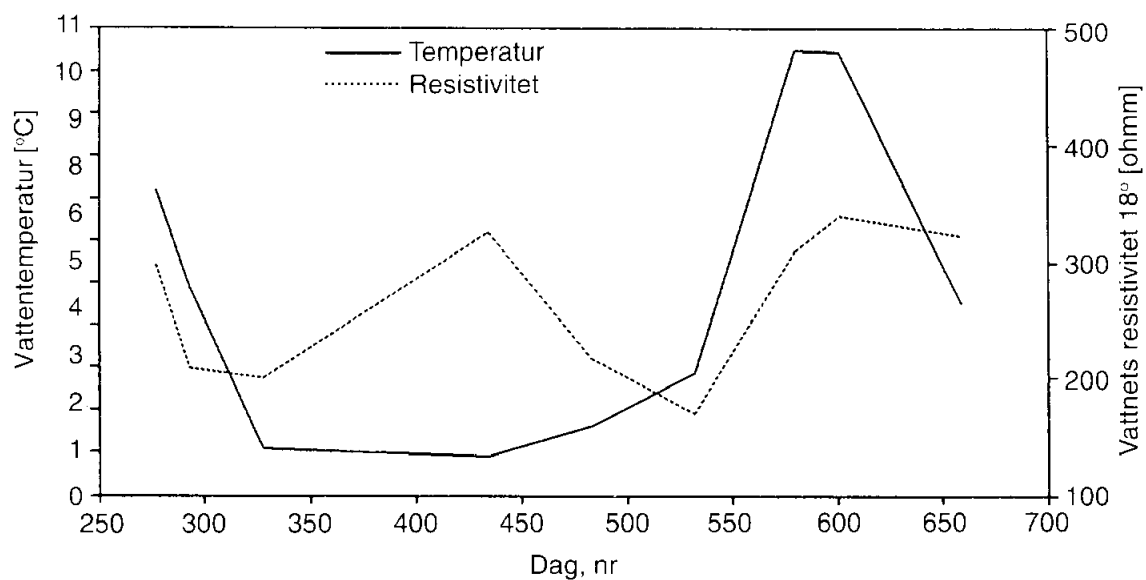
Figur 3.4. Lufttemperatur (dygnsmedelvärde) och dygnsnederbörd i Ritsem.

Magasinsvattnets temperatur och konduktivitet

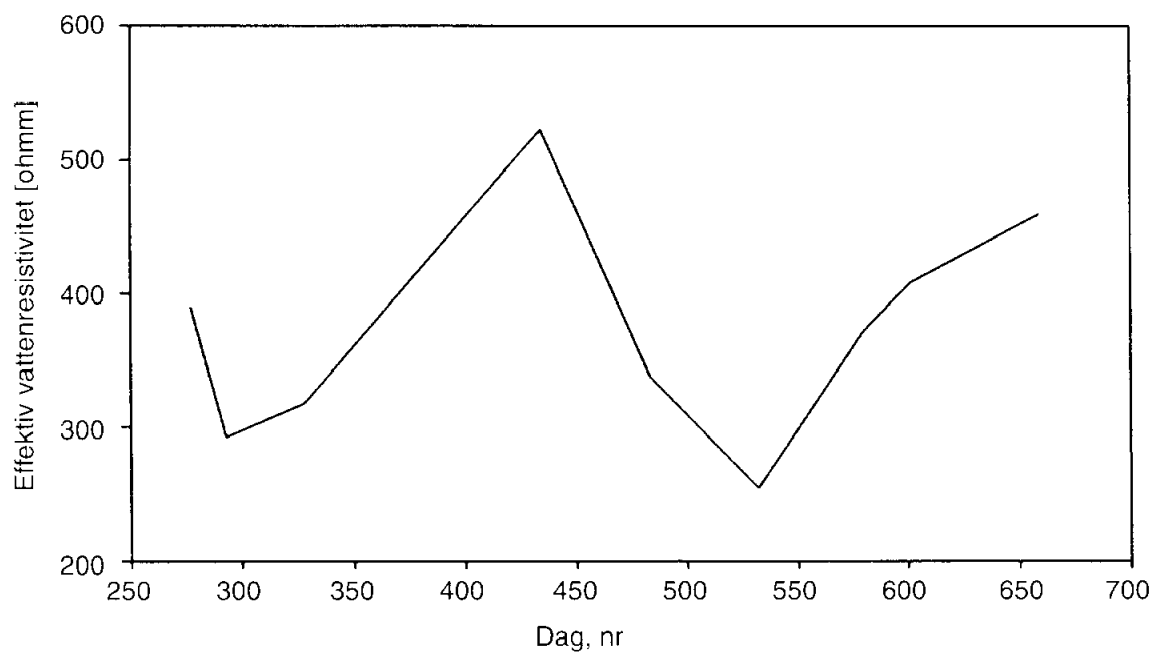
Magasinsvattnets temperatur och konduktivitet har bestämts ett antal gånger under mätperioden. Prover har tagits i ett område uppströms och nära dammen med relativt kraftig vattenströmning. Resultatet framgår av tabell 3.1 och figur 3.7.

Det finns ett samband mellan en saltlösningens resistivitet och dess temperatur (McNeill, 1980). Genom att använda sambandet kan den aktuella resistiviteten i magasinavattnet vid den uppmätta vattentemperaturen beräknas. Resultatet av en sådan beräkning framgår av figur 3.8.

Av figur 3.8 framgår att magasinavattnets temperaturberoende resistivitet under vår observationsperiod innehåller två resistivitetsminima – det första under senhösten/förvintern 1993 och det andra under sommaren 1994.



Figur 3.7. Suorvamagasinet. Vattnets temperatur och elektriska resistivitet under perioden 4 oktober 1993 till 21 oktober 1994.



Figur 3.8. Resistivitet i magasinsvattnet, med hänsyn tagen till aktuell vattentemperatur vid provtagningstillfället.

4. DATAKVALITET

4.1. SP-data

Självpotentialdata är av god kvalitet. Uppmätta självpotentialer varierar inom ett intervall av cirka 400 mV. Standardavvikelsen för dygnsmedelvärden är vanligen mindre än 6 mV. Dessa standardavvikelser är endast något högre under vinterperioden.

Under vinterhalvåret, den period då dammkroppens yta är tjälad, uppträder stora variationer i SP som är direkt relaterade till tjälning. Effekten kan kopplas till den resistivitetsförändring som uppträder när marken tjälas. Sill (1983) och Fitterman (1979) har modellerat effekten av förändringar på SP-fältet orsakade av resistivitetskontraster i modellen.

Variationerna är störst i m-slingan, vilket tolkas bero på kraftigare tjälning i den övre delen av dammkroppen. Under den period då marken är tjälad minskar därför möjligheterna att med god kvalitet registrera flöden genom dammkroppen. Den allmänna SP-fördelningen över dammen är däremot mätbar även under vintern.

4.2. Resistivitetsdata

Resistivitetsdata har varit av god kvalité under hela året i de kombinationer där strömelektroderna i inspektionsbrunnarna använts. Detta beror på att fukten och värmen i inspektionsbrunnarna hållit nere övergångsmotståndet mellan elektrod och tåtkärna. Ett lågt övergångsmotstånd möjliggör hög utsänd strömstyrka, vilket ger ett gott signal/brusförhållande.

Ute på dammen har situationen emellertid varit en annan. Under tjälperioden har de flesta strömelektroder haft svårt att utsända den strömstyrka som krävs för god mätning eftersom övergångsmotståndet mellan elektrod och omgivning blivit för högt till följd av torka och tjäle.

5. DATABASEARBETNING, ANALYS- OCH TOLKNINGSMETODIK

5.1. Databearbetning

Den grundläggande databearbetningen sker redan i samband med själva mätningen vid dammen. SP-data medelvärdesbildas sedan dygnsvis inför den vidare bearbetningen (se avsnitt 2.2). Filer lagras som sedan ligger till grund för framställning av kartor visande SP-variationer över dammen.

Både SP- och resistivitetsdata sorteras och läggs in i filer med en struktur som medger uppritning av variationer som funktion av tiden. Liknande filer läggs också upp för klimatvariabler och vattenståndsvariationer.

5.2. Analysmetodik

Analysarbetet har baserats på intuitiva resonemang, kvalitativa bedömningar och på enkla statistiska analyser av data. I den ursprungliga formuleringen av projektet avsågs s k multivariatanalys att användas – så har ej skett. Orsaken ligger i klimatet. Sommaren 1993 var regnrik med hög magasinsnivå som följd, sommaren 1994 var dock regnfattig varför ingen fullständig magasinsnivåcykel erhöles. I själva verket var skillnaden i amplitud mellan de bägge årsmaxima så stor som cirka 10 m.

Vad gäller självpotentialdata har mätningarna som hittills gjorts på Suorvadammen ökat kunskapen om hur mättekniken måste anpassas till mätsystem med omgivning, dammens reaktion och klimatet. Bland annat har mätserien bekräftat några av de störkällor som anges i litteraturen, exempelvis ett självpotentialfält inducerat av regn.

Redan tidigt konstaterades svårigheterna att särskilja olika effekters inverkan på resistivitetsdata. Där spelar framförallt tre faktorer in:

- Den stora vattenståndsvariationen i Suorvamagasinet.
- Den komplicerade resistivitetspulsen genom variationer i magasinsvattnets temperatur och resistivitet.
- Kraftiga resistivetsvariationer i stödfyllningen och övre delen av tät kärnan till följd av tjälning och varierande fukthalt.

På grund av svårigheterna har därför främst SP-data studerats på olika sätt. Studierna har koncentrerats till data från den tjälfria delen av året. I huvudsak har följande studier genomförts:

1. Studier av SP-nivåer över dammkroppen relativt referenselektroden. Detta utförs genom att plotta upp SP-värdet över dammkroppen vid olika tidpunkter. En isonivåkarta över SP-värden har sedan beräknats.

2. Studier av relativa SP-nivaer över dammkroppen har utförts genom att medelvärdesbilda SP-data över hela dammen vid en viss tidpunkt (och därmed ett visst vattenstånd), för att på så vis erhålla bakgrundsnivån. Därefter har de individuella SP-värdena studerats i förhållande till bakgrundsnivån genom differensberäkning. Ur detta har isoanomalikartor framställts.
3. Studier av differenser i SP-värden över hela dammen mellan olika tidpunkter med ökande respektive sjunkande vattenstånd. Framställning av isodifferenskartor.
4. Studier av differentiell SP mellan närliggande elektroder som funktion av vattenstånd. Linjär regression.
5. Jämförelser mellan SP-värden sommaren 1993 och 1994.

6. SJÄLVPOTENTIALMÄTNINGAR

6.1. Allmänt

Mätningar av den naturliga elektriska potentialen, den sk självpotentialen, har utförts på Suorvadammen i huvudsak kontinuerligt sedan augusti 1993. Mätningar har skett i 45 potentialelektroder på dammen mot en referenselektrod belägen utanför dammen. Denna rapportering omfattar data t o m 13 november 1994.

6.2. Variation i SP under året till följd av vattenståndsförändringar i magasinet

Under det dryga år som mätningar av SP har ägt rum har vattenståndet i magasinet varierat enligt figur 3.3. Tryckgradienten är som högst, mellan upp- och nedströmssida, när vattenståndet är som högst i magasinet.

Helmholtz-Smoluchowski (HS) ekvationen (härledning presenterad av Overbeek, 1952) ger vad som sker med strömningspotentialen över ett poröst prov då en vätska flyter genom porerna:

$$\frac{\Delta V}{\Delta P} = \frac{-\zeta \epsilon}{\eta \sigma}$$

där

ΔV = skillnad i elektrisk potential över provet (strömningspotential), [V]

ΔP = skillnad i tryck över provet (trycket som driver vätskeflödet), [N/m²]

ζ = zetapotential, vilken definieras som potentialen på det plan som befinner sig närmast den yta på vilken vätskeflödet arbetar, [V]

ϵ = vätskans dielektricitetskonstant, [As/Vm]

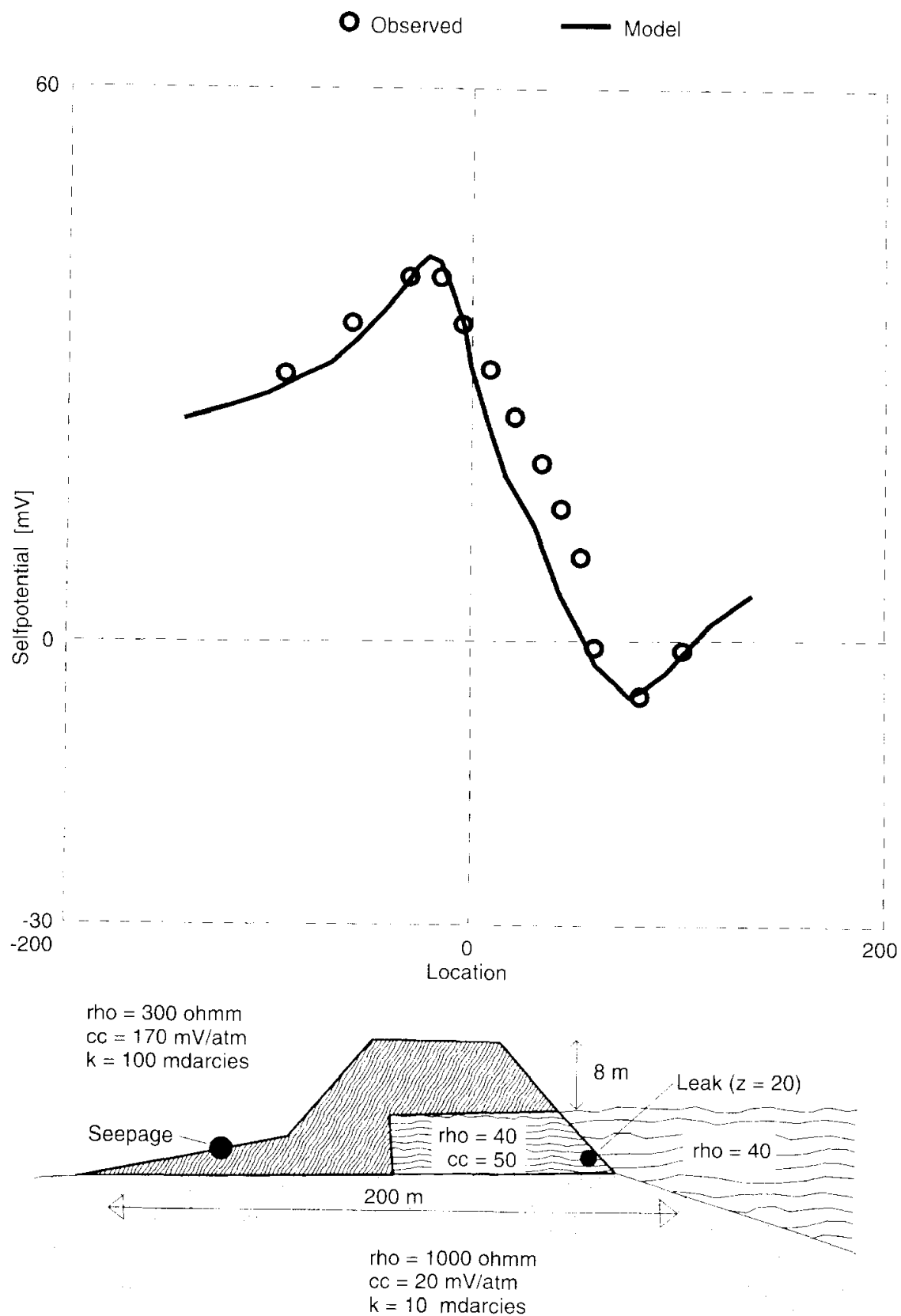
η = vätskans dynamiska viskositet, [Ns/m²]

σ = vätskans elektriska konduktivitet, [S/m]

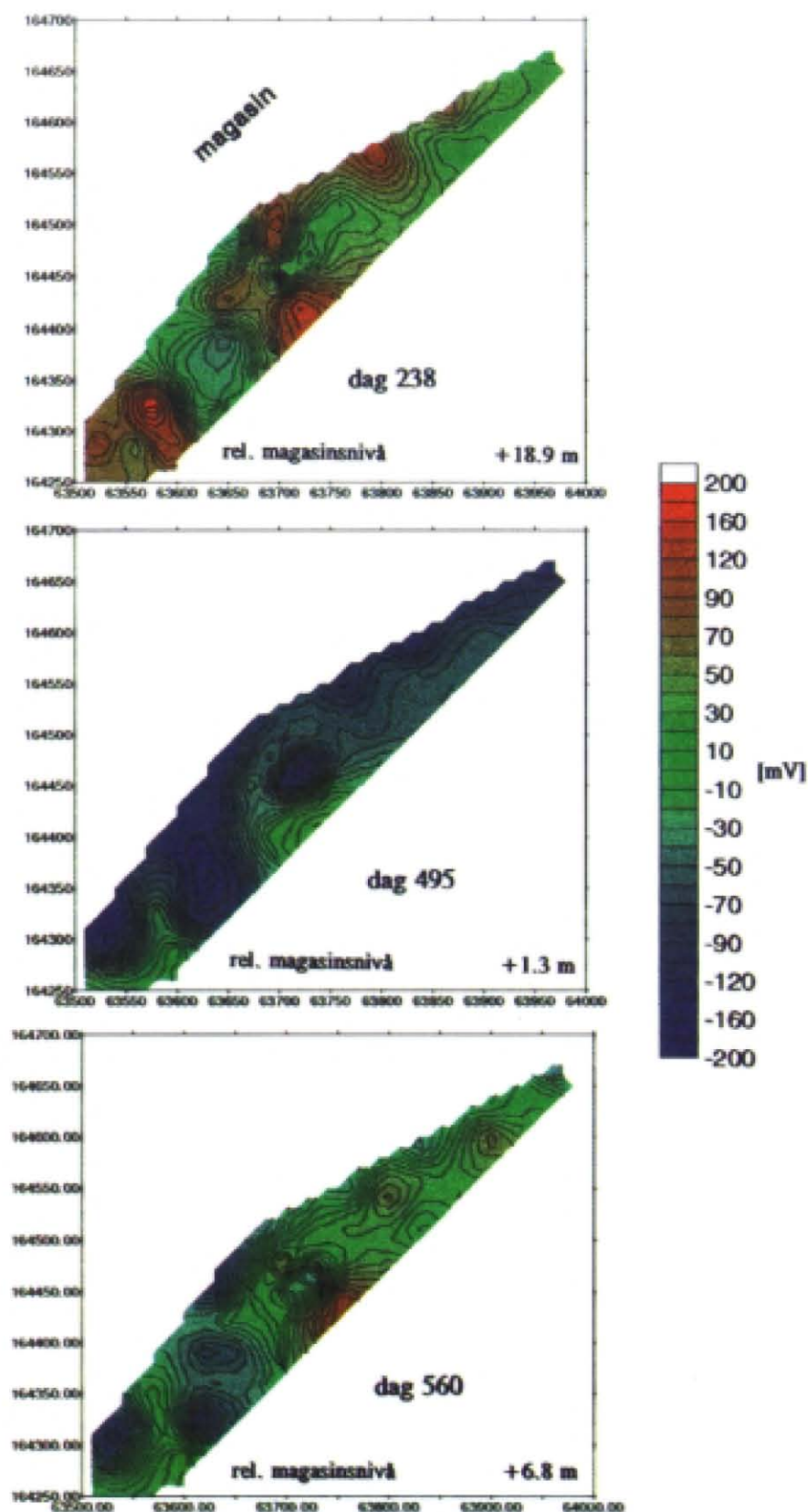
Av ovanstående framgår bl a att en hög tryckgradient ger en högre potentialskillnad mellan upp och nedströmssida. Olika jordarter ger olika potentialskillnader p g a olika zetapotentialer. Värderna på zetapotentialen för olika svenska jordarter tas fram i ett pågående forskningsprojekt på Högskolan i Luleå (Friborg, 1995). Erfarenhetsmässigt vet man att mycket täta jordarter ger låga potentialskillnader p g a lågt flöde. Mycket grovkorniga jordarter ger också låga potentialskillnader p g a svårigheterna att upprätthålla en tryckgradient.

Strömningspotential som induceras av ett vattenflöde genom en dammkropp har modellerats av Wilt och Corwin (1988). Ett exempel på en modellering och mätvärden från en riktig damm framgår av figur 6.1.

Som framgår av figuren erhålls en positiv potential på nedströmssidan av en damm, dvs där utströmning äger rum. Med modellexperimentet och HS ekvation i minnet, bör slutsatsen bli att självpotentialfältet på Suorvadammens nedströmssida bör vara högre ju högre vattennivån är i magasinet.



Figur 6.1. Modell för beräkning av strömningspotential på Beaver dam, samt jämförelse mellan modellerade och uppmätta data. Efter Wilt och Corwin, 1988.



Figur 6.2. Absoluta SP-värden på Suorvadammen Ostra vid tre olika tillfällen. Vattenståndet var som högst dag 238, som lägst dag 495, och under pågående stigning dag 560. Som framgår av figuren följer SP-fältet med.

Resultat från våra SP-mätningar verifierar modellerna. I figur 6.2 redovisas SP-data från tre tillfällen (på kartor framställda enligt avsnitt 5.2 punkt 1). SP-mätningar i augusti 1993, med det högsta vattenståndet under mätperioden, visar hur självpotentialfältet generellt ligger över +10 mV över större delen av dammen. En jämförelse med SP-data från maj 1994, då vattenståndet var cirka 18 m lägre, visar att självpotentialfältet har sjunkit kraftigt över hela dammen. I juli 1994 hade vattenståndet börjat stiga igen och låg då cirka 5 m över majståndet. SP-värdena hade följdriktigt stigit.

Dammen reagerade alltså som väntat på vattenståndsvariationerna. En strömningspotential i den Östra Suorvadammen har således konstaterats förekomma, vilket är den första förutsättningen för att systemet skall kunna detektera anomal strömning. Att avgöra vad som är anomal strömning är givetvis svårt eftersom normalvärdet för strömning är individuell för olika dammar. Den taktik vi använder går i stället ut på att:

- Identifiera zoner med inhomogen strömning.
- Studera ovanstående zoner med avseende på förändringar i zeta-potential som kan indikera ökande strömning alternativt förändrad materialsammansättning.

Studier av positiva anomaliers läge indikerande utströmning (kartor framställda enligt avsnitt 5.2 punkt 2.) visar hur utströmningen förflyttas mot krönet då vattenståndet stiger, figur 6.3. En principiell förklaring till detta ges i figur 6.4. När vattenståndet stiger, närmar sig de elektriska pluspolerna (som utströmningen gett upphov till) krönet. Kopplingen blir då starkare till potentialelektrodena nära krönet. Anomalien har förflyttat sig från elektroderna längre ned på slänten mot elektroderna närmare krönet.

Under 1994 var vattenståndet lägre i magasinet. Följaktligen blev de relativa SP-anomalierna lägre än 1993, se figur 6.5. De stannade också längre ifrån krönet på de ovan beskrivna geometriska effekter. Trots det mycket låga vattenståndet i maj 1994, påträffades betydande positiva anomalier längst ned vid släntfoten. Detta tolkas som smält/regnvatten som mynnar fram vid släntfoten, eller magasinetsvatten som via sprickor i berggrunden letar sig fram hit.

En annan iakttagelse av vikt är att en ny SP-anomali uppkommit i nordöstra delen av dammen (vid elektrod n3). Den fanns inte i data 1993. I december 1993 installerades mätrör i ett sjunkhål cirka 60 m nordost om detta område. Det har dock ej varit möjligt att direkt binda samman förändringar i SP-data med sjunkhålets uppkomst, ej heller med installationen av observationsröret.

6.3. SP-anomalier som indikerar utströmningsområden

Ett antal anomalier som tolkas markera utströmningsområden har identifierats. Ett utströmningsområde markeras av en positiv anomali relativt omgivningen. Differenskartor (enligt avsnitt 5.2 punkt 3) visar var strömningspotentialen ökar med ökande vattenstånd. En differenskarta visas i figur 6.6, där differensen i SP-värden mellan två mättillfällen sensommaren 1993 framgår.

Kartan visar i huvudsak 4 områden, med den mest markerade i sydväst. Ett femte koncentrerat utströmningsområde kan ha uppkommit under senhösten/förvintern 1993. Det finns dock inte med bland data från 1993, varför vi tolkar att den uppkommit i ett stadium då effekter av tjälning maskerat dess tillblivelse.

Ett sätt att studera om förändringar i strömning uppträder som tyder på inhomogeniteter i dammkroppen, är att jämföra två närliggande elektroder med varandra. Om dammen är homogen borde två närliggande potentialelektroder med liknande geometrisk koppling till tåtkärnan reagera ungefär lika vid en förändring i vattenstånd. Ett sådant exempel för elektroderna n2-n1 visas i figur 6.7.a. Differensen är oberoende av vattenståndet, varför homogen strömning tolkas förekomma i den volym som elektroderna främst undersöker. I figur 6.7.b visas differensen mellan elektroderna m9 och m8. Här skiljer sig förhållandena från ovan. Det finns en tydlig koppling mellan förändrat vattenstånd och förändring i SP mellan de två elektroderna. De reagerar alltså olika varför strömningen tolkas som inhomogen. (Att data uppvisar spridning orsakas av exempelvis regn och tjälning/upptining). I figur 6.7.c för elektroderna n9-n8 är strömning homogen under relativ nivå cirka 17 m. över denna tycks inhomogen strömning uppkomma. En inhomogenitet i tåtkärnan kan således finnas vid den relativa nivån 17 m.

Regressionsanalys har utförts för samtliga närliggande elektroddar på de bägge övre terrasserna på dammen. Enbart barmarksdata har använts. Regressionslinjernas lutningskoefficienter kan ses i figur 6.8.

Ett område med förhöjd strömning skall utmärkas av en asymmetrisk anomali, med ett minima och ett maxima på var sin sida om en inflexionspunkt. 4 utströmningsområden kan ses i figuren vid koordinaterna 310, 460, 540 och 670.

Utströmningszonen vid koordinat 310 är knappt urskiljbar på den övre terrassen. Detta tolkas som att utströmning sker nära dammens bas. Anomalin vid 670 återfinns inte på samma ställe på den övre terrassen. Troligen finns här flera utströmningszoner på olika djup. Utströmning vid 460 och 540 sker troligen inte på så stort djup som vid 310. Det negativa värdet vid 200 (nedre terrassen) beror på att en positiv SP-anomali uppkommit i detta område under 1994 när vattenståndet var lågt. Regressionsvärdet är därför troligen felaktigt.

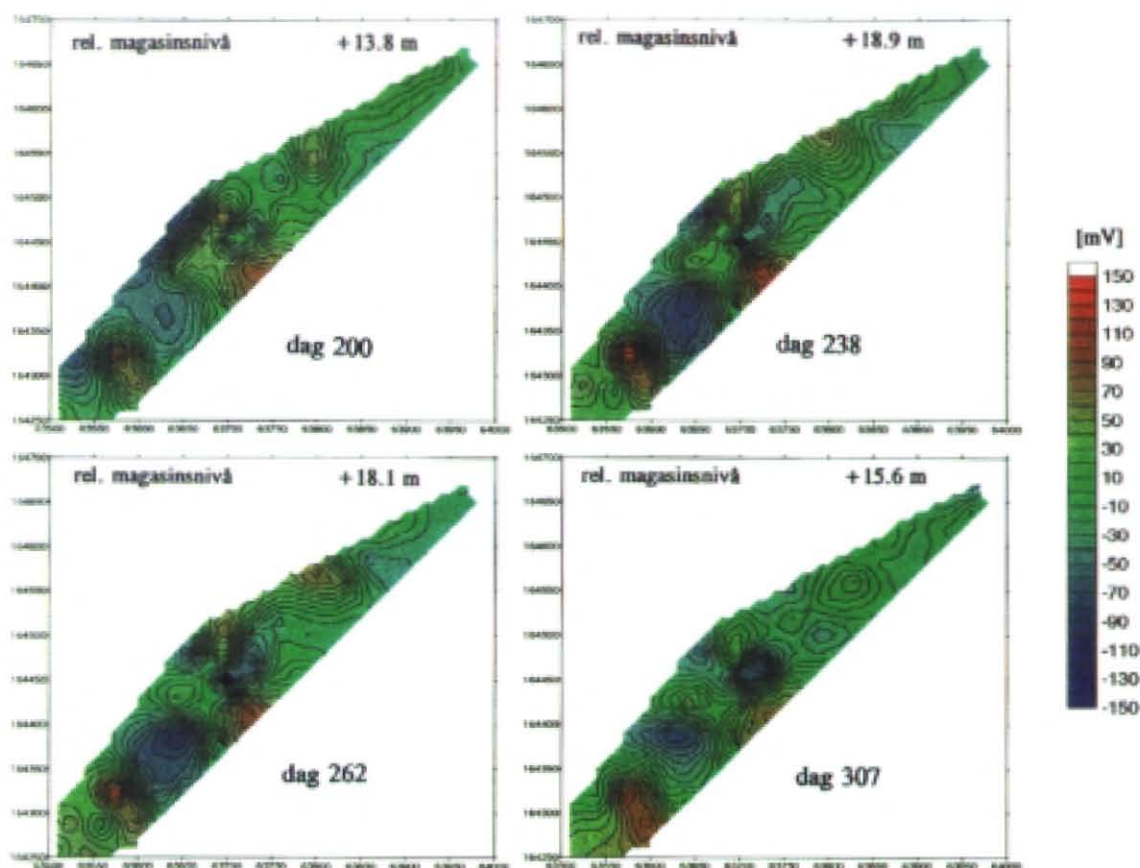
Denna teknik där differentiell SP kombineras med linjär regression bedöms vara en framkomlig väg för att identifiera förändringar i strömning inom en volym.

Differens-SP indikerar att vinterdata i n-slingan är mer diagnostiska vad gäller flödesdetektion än motsvarande data i m-slingan. Detta tolkas sammanhållt med att de djupare delarna av tåtkärnan ej är påverkade av tjäle och att elektroderna är mer skyddade för låga temperaturer av snötäcke.

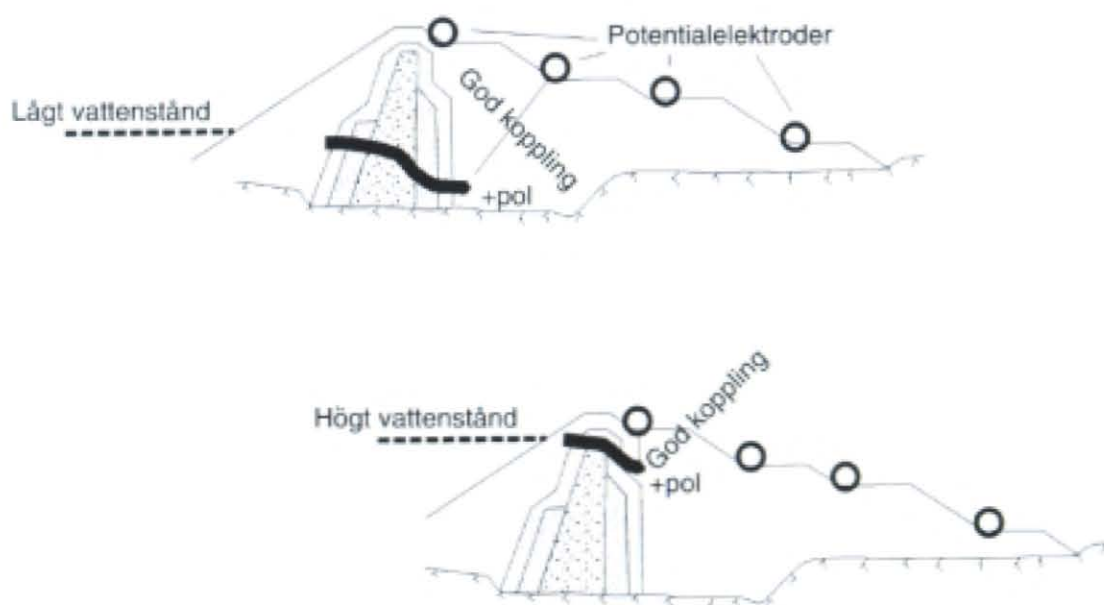
I figur 6.9 presenteras en summering av våra slutsatser vad beträffar anomala utströmningsområden. 4 områden har förekommit i data såväl 1993 som 1994. Under vintern 1993/1994 uppkom ett nytt område i nordöstra delen av dammen. Området med den mest accentuerade strömningsanomalin tolkas vara beläget längst i sydväst.

6.4. SP-anomalier och deras koppling till skrot

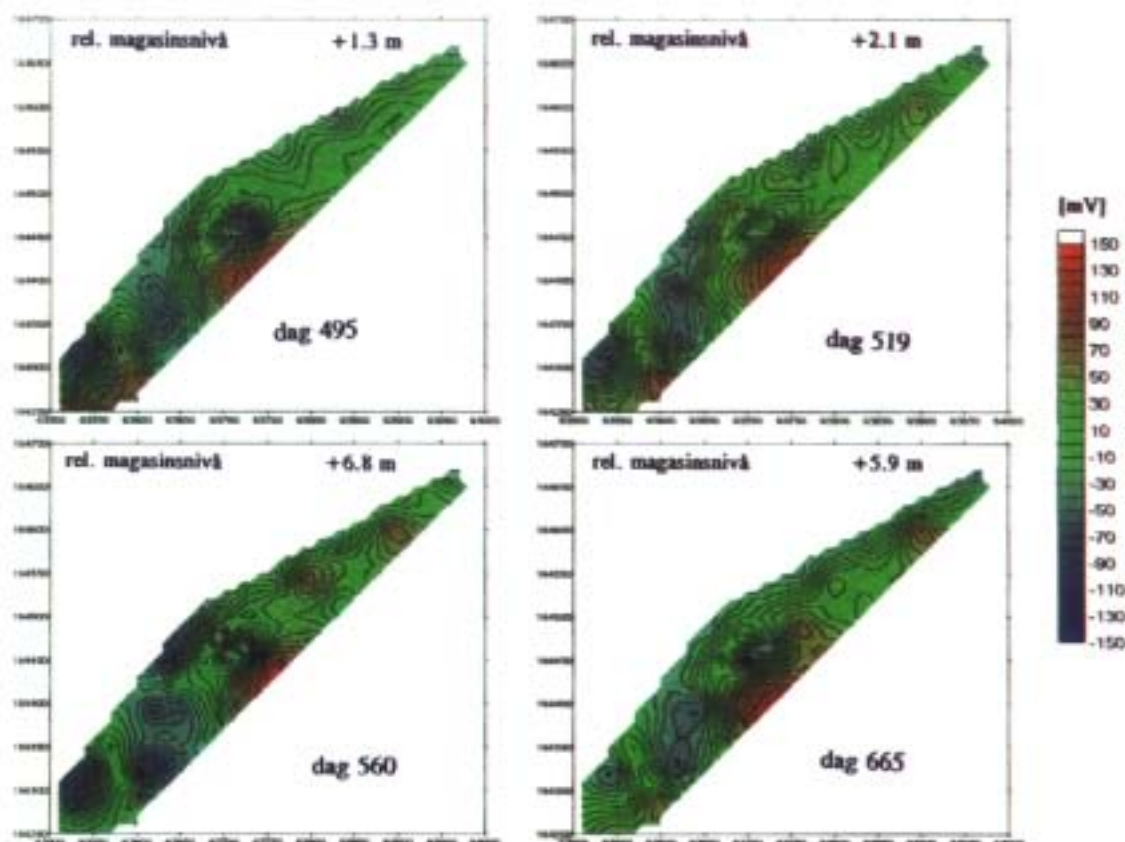
På dammen finns ett antal SP-anomalier vilka inte följer de mönster som strömningsinducerade anomalier uppvisar. Tidigt diskuterades möjligheten att dessa kunde orsakas av skrot i dammkroppen. Vid arbetet med installationen upptäcktes nämligen metallskrot i stödfyllningen, dessutom finns foderrör till borrhål i krönet.



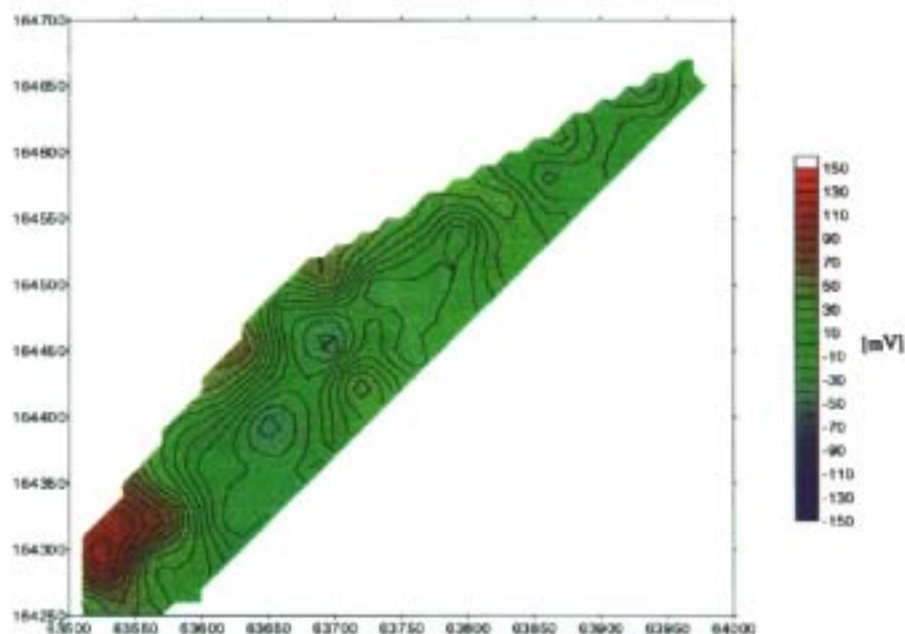
Figur 6.3. Relativa SP-värden i förhållande till ett medelvärde för hela dammen vid det aktuella mättillfället under 1993. Detta framhäver lokala anomalier och visar hur positiva anomalier visande utströmningsområden förflyttar sig närmare krönet då vattenståndet stiger.



Figur 6.4. Principiell skiss som visar varför SP-anomalierna förflyttas mot krönet när vattenståndet stiger.



Figur 6.5. Relativa SP-värden i förhållande till ett medelvärde för hela dammen vid det aktuella mättillfället under 1994. Positiva anomalier vid nedströms slänkfot tolkas vara orsakade av regn/smältvatten eller av magasinssvatten som via berggrunden letat sig fram till detta område. En ny anomali uppträder i den nordöstra delen av dammen, den har inte återfunnits i data från 1993.



Figur 6.6. Differenskartan visar förändringar i SP-fält vid ökande vattenstånd. Differenskartan har framställts som SP vid dag 238 minus SP vid dag 200 (1993). Fyra markerade utströmningsområden indikeras.

Grün (1994) utförde magnetiska mätningar och förtätade SP-mätningar på dammkroppen. Projektet samfinansierades av Norrbottens Forskningsråd, Elforsk AB och Triumf Geophysics AB. Grüns sammanfattning i originaltext på engelska presenteras i Appendix 1. Grün visar att ett antal mindre SP-anomalier med kort våglängd är rumsligt relaterade till anomala gradienter i det magnetiska fältet. Den normalt låga amplituden hos dessa SP-anomalier innebär emellertid att dessa inte nämnvärt påverkar möjligheterna att prognosticera flödespotentialer.

Grün detaljundersökte vidare en kraftig negativ SP-anomali i den centrala delen av dammen. Djupet till dess övre pol tolkas av honom till mindre än 5 m. Anomalikällans läge liksom dess partiella koppling till en magnetisk anomali gör det troligt att den utgörs av metallskrot. En kraftig negativ anomali i den sydvästra delen av dammen är inte direkt korrelerad till någon magnetisk anomali.

Arbetet visar att ett flertal av påträffade magnetiska anomalier inte korrelerar till kraftiga SP-anomalier. Detta kan tolkas så att en torr stödfyllning, med mindre volymer skrot utan kontakt med grundvatten eller dammkärna, ej förmår skapa kraftiga SP-fält. Trots detta bör man inför installation av elektroder utföra en inledande magnetisk mätning kombinerad med en rörlig självpotentialmätning, då man på detta sätt kan undvika eventuellt metallskrot som skulle kunna orsaka störningar i de efterföljande bevakningsmätningarna.

6.5. SP-anomalier inducerade av regn

I brist på lokala väderobservationer vid Suorvadammen har data från Ritsem använts vid studier av nederbördens eventuella inverkan på SP-mätningar. Då Ritsem är beläget drygt 30 km uppströms den undersökta dammen, introduceras en osäkerhet. Analysen tolkas trots detta vara relevant då jämförelser av nederbörd mellan Ritsem och Aluöktä, där den senare är belägen några mil nedströms den Östra Suorvadammen, uppvisar likheter.

Vi har sett effekter av regn på våra SP-mätningar. Dessa har yttrat sig som störningar i SP-data. Ett exempel presenteras i figur 6.10. Orsaken till dessa SP-anomalier är att kraftiga regn skapar en vertikal vattenströmning i dammytan där elektroderna sitter, vilket ger upphov till en negativ potential i markytan. Sannolikt minskar markisolering, hinkar och rösen, störningens amplitud. Motsvarande effekt kan förväntas av snösmältning.

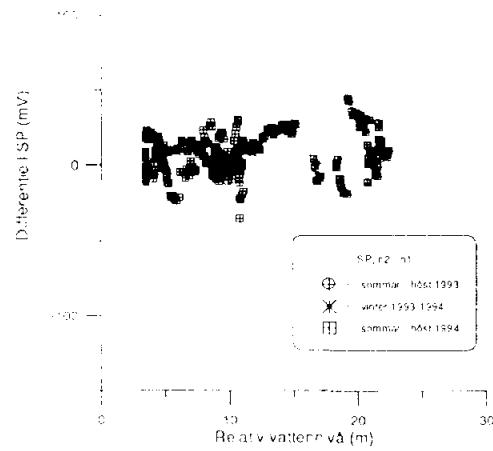
Som framgår av figur 6.10 förflyttar ett regn SP-kurvan i negativ riktning. Det dröjer cirka 14 dagar innan kurvan har återhämtat sig till den ursprungliga nivån. Upprepade regn kommer således att generellt sänka SP-fältet över hela dammen. En torr sommar däremot kanske kan medföra att SP-fältet i slutet av sommaren kommer att vara generellt högre över hela dammen.

Effekten av regn är likartad för de flesta av elektroderna på dammen och kommer därför till stor del att elimineras vid regressionsanalys enligt ovan.

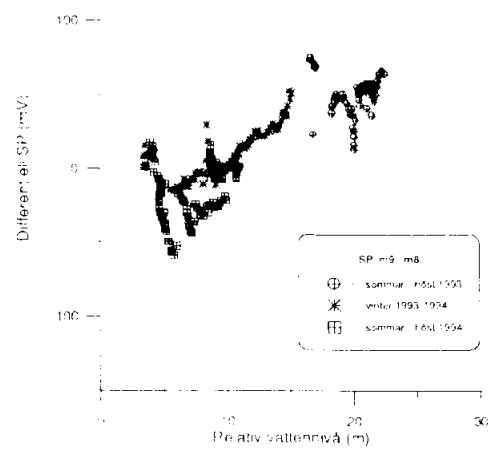
6.6. Telluriska fält och deras inverkan på SP-data

Två extra referenselektroder har placerats ut i rätt vinkel från referenselektroden för att möjliggöra registreringar av telluriska strömmar. Dessa har dock visat sig ge upphov till endast låga potentialvariationer vilket också avspeglar sig i de låga standardavvikelserna för dygnsmedelvärden av SP. Den klart största källan till brus är 50 Hz signaler från kraftnätet.

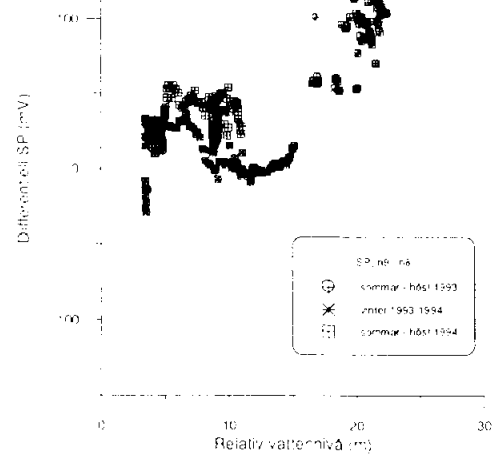
a.



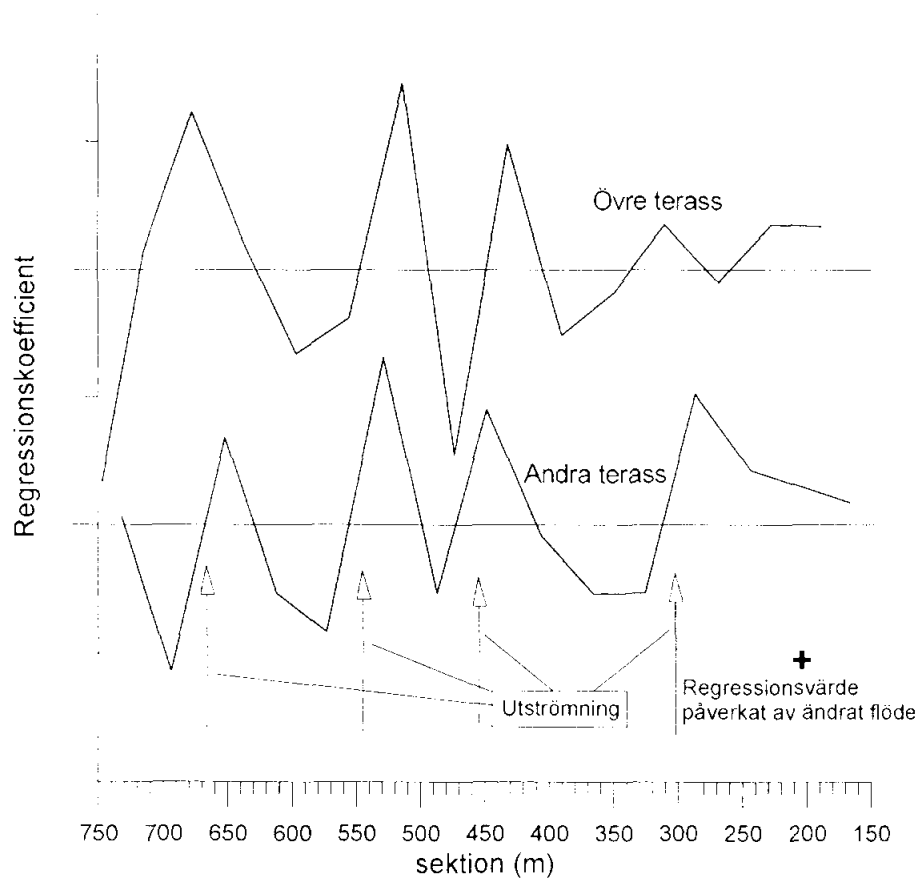
b.



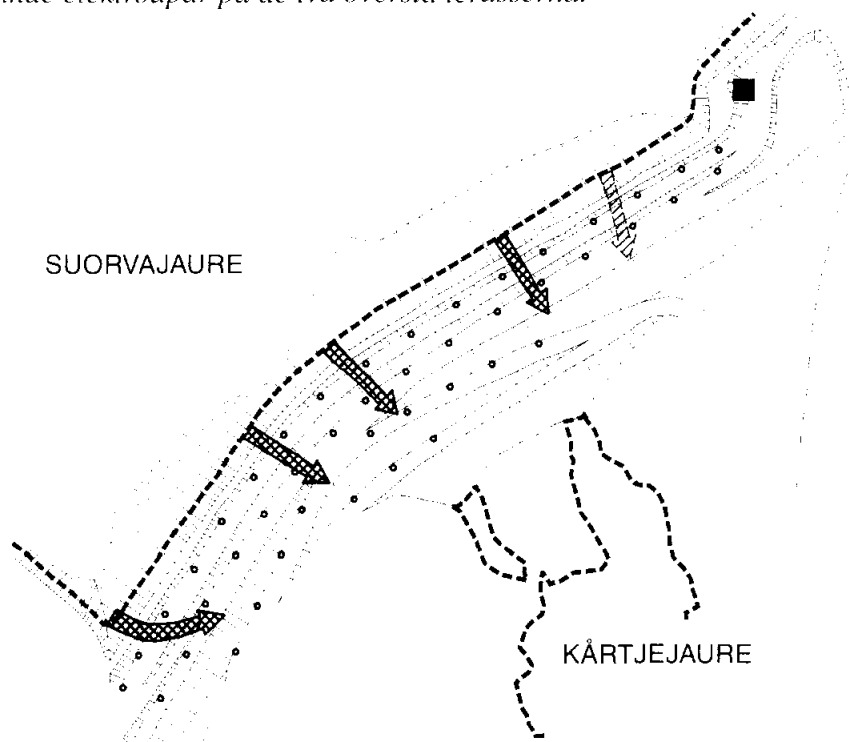
c.



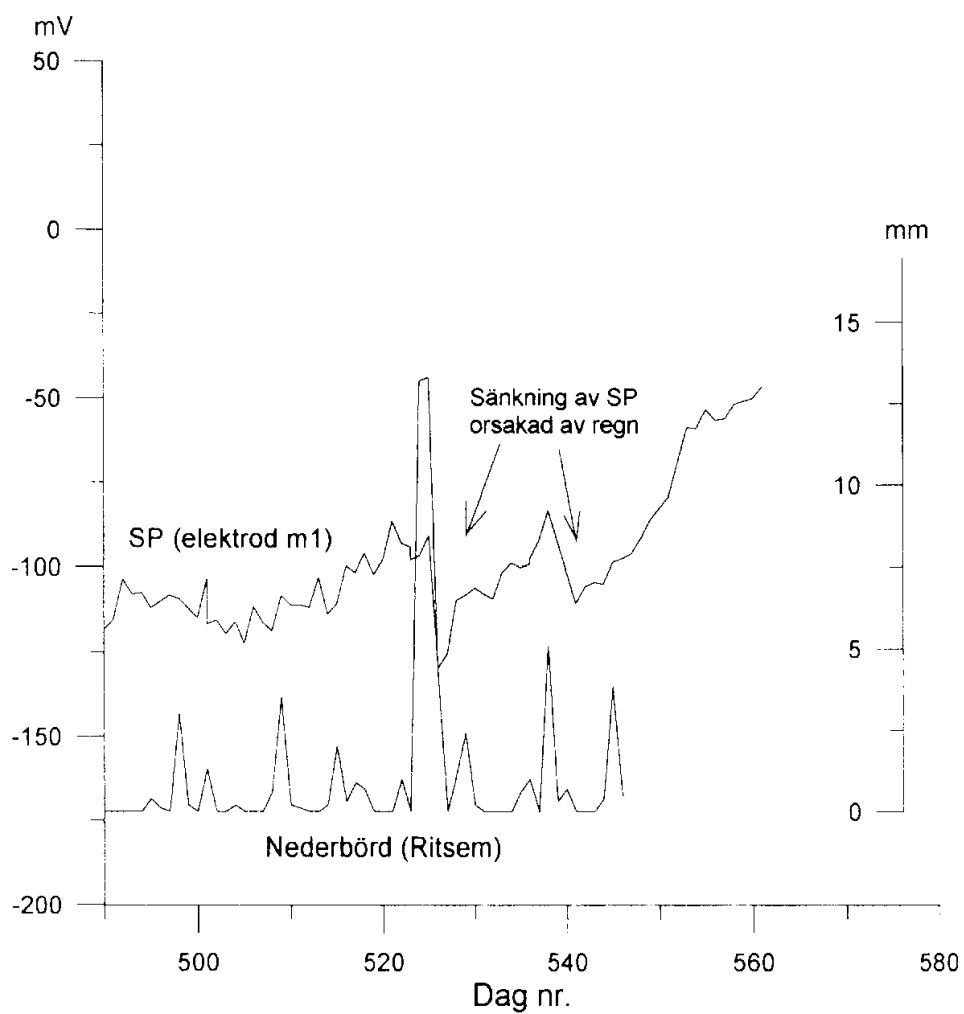
Figur 6.7. Differens i SP mellan två närliggande elektrodpar vid olika vattenstånd, med liknande koppling till tätkärnan. **a.** Elektrodena n2-n1 uppvisar ingen nämnvärd skillnad i reaktion vid förändringar i vattenstånd. Därav kan man dra slutsatsen att vattenströmningen genom tätkärnan är homogen. **b.** Elektrodena m9-m8 tolkas visa att inhomogen strömning förekommer. **c.** Differensen mellan n9-n8 tolkas visa att inhomogen strömning förekommer ovanför relativ vattennivå 17 m.



Figur 6.8. Regressionsanalys av differens i SP-värde som funktion av vattenstånd mellan närliggande elektrodpar på de två översta terrasserna.



Figur 6.9. Områden där inhomogen strömning tolkas förekomma. Fyra av områdena har funnits under såväl 1993 som 1994. Det femte (streckat) tolkas ha uppstått under vintern 1993/1994 och har därför endast förekommit i SP-data från 1994.



Figur 6.10. Regninducerade SP-anomalier på Suorvadammen. Data om nederbörd från Ritsem.

7. RESISTIVITETSMÄTNINGAR

7.1. Allmänt

Resistivitetmätningarna har utförts i 75 kombinationer av inkopplade ström- och potential-elektroder på dammkroppen. Under den tjålfria delen av året har samtliga strömelektroder utsänt den ström som krävs för ett erhålla goda signal/brusförhållanden. Tjålen har dock förhindrat god utsändning av ström på dammkroppen, utom där strömelektroderna i inspektionsbrunnarna använts.

Under projektets gång har vi haft svårigheter att tolka ut entydig information ur resistivitetmätningarna eftersom resistiviteten är kopplad till så många faktorer. Vår analys är därför kvalitativ till naturen, och i detta stadium relativt omogen.

7.2. Temperaturer i dammen och dess inverkan på resistiviteten

Mätningar av temperatur har utförts i ett antal borrhål på Suorvadammen Östra av Vattenfall Hydropower AB. Vi har tagit del av mätningar som utförts under 1993 och 1994 i 6 borrhål. 5 av borrhålen är belägna omkring strömelektrod a1 och ett nära strömelektrod a5.

Under den tid vi utfört mätningar på dammen har temperaturen i borrhålen varierat från cirka 2,5–3° C upp till drygt 4° C. Variationerna har alltså varit relativt små. Det måste emellertid nämnas att temperaturmätningarna under projektiden varit relativt glesa i tiden, varför större variationer kan ha förekommit.

Frågan är vilken effekt temperaturvariationen i tätjärnan kan ge upphov till på bulkresistiviteten i tätjärnan. Om man beräknar variationen med Archies lag, under antagandet att porvattnet har en resistivitet av 300 ohmm vid 18°, skulle den, med en porositet omkring 15%, ge en sänkning av bulkresistiviteten med i storleksordningen ett par hundra ohmm vid en temperaturhöjning från 3° till 4°.

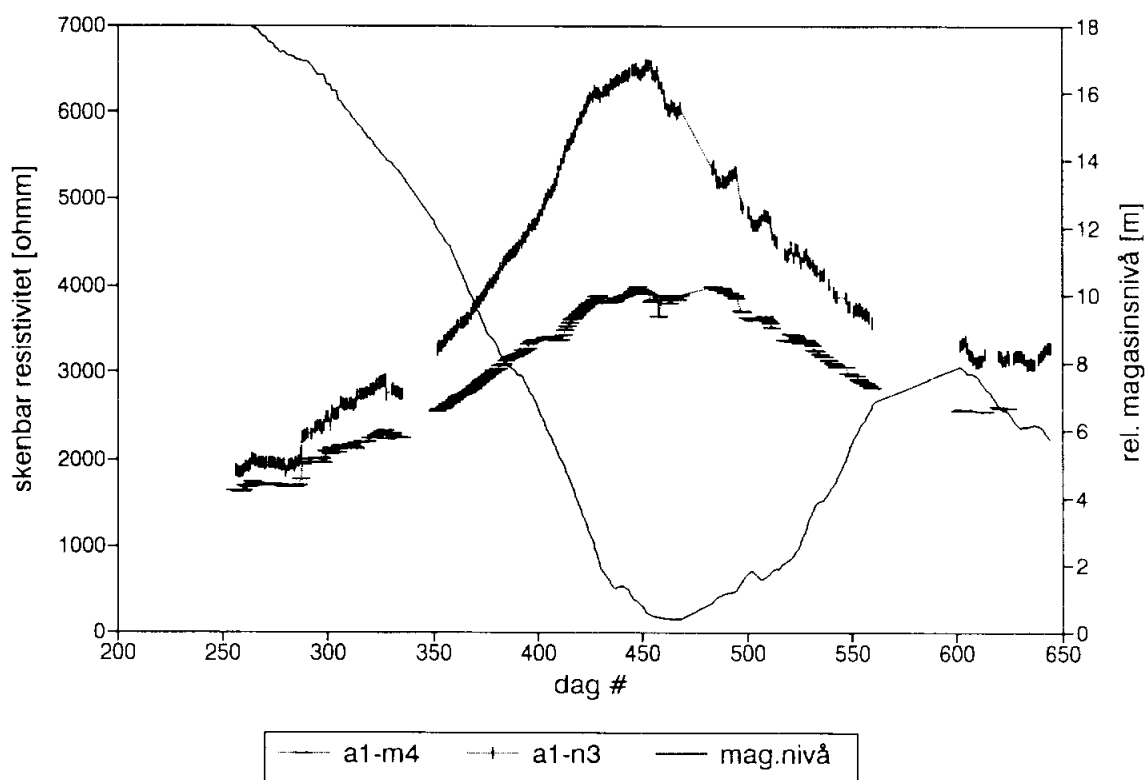
Archies lag förutsätter att jorden är uppbyggd av porvatten i en matrix av isolatorer, dvs en jord utan lermineral. Tätjärnan utgörs av morän och uppfyller inte detta antagande. Lermineralinnehållet är tvärtemot nödvändigt för att ge tätjärnan dess önskade funktion. Tätjärnan har alltså en resistivitet som till stor del påverkas av lermineralinnehållet, och som därför ligger i ett lägre resistivitetsintervall än vad som förutsattes i beräkningen ovan (McNeill, 1980). Inverkan av temperaturen på bulkresistiviteten torde därför sannolikt vara betydligt lägre än ett par hundra ohmm.

7.3. Resistivitetsens koppling till vattenståndet i magasinet, lufttemperatur och fuktighet i stödfyllning

Som väntat finns en stark koppling mellan magasinsnivån och den uppmätta resistiviteten på dammen. Dels kommer en stor del av den utsända strömmen att leta sig ut i volymen erosionsskydd/magasinsvatten, dels förändras vatteninnehållet i tätjärna/filtermassor.

Kopplingen mellan magasinsnivå och resistivitet framgår av figur 7.1. I figuren redovisas den skenbara resistiviteten vid mätningar med strömelektrod a1 mot potentialelektrod m4 respektive n3. För kombinationen a1 - n3 uppstår resistivitetsmaximum före magasinsnivå-minimum vilket kan bero på stark koppling till lufttemperaturen och därmed resistiviteten i stödfyllningen.

Samma magasinsnivå vid sjunkande respektive stigande vattenstånd ger inte samma skenbara resistivitet. Orsaken torde delvis vara lufttemperaturen som påverkar resistiviteten i dammens ytregion. Tjälad jord är närmast en isolator, >100 000 ohmm, medan resistiviteten i otjälad fuktig morän återfinns i intervallet 500–2 000 ohmm. Till detta kommer inverkan av fukthalt i stödfyllningen som också torde variera under året.



Figur 7.1. Sambandet mellan vattenstånd och uppmätt resistivitet på dammkroppen.

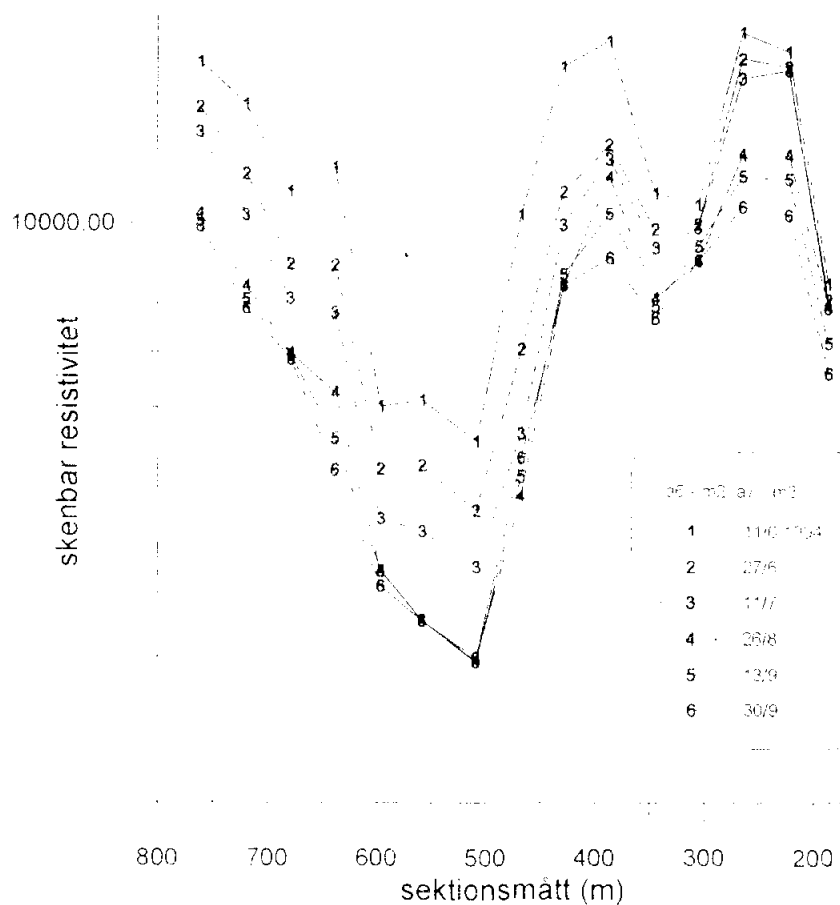
7.4. Slutsatser om dammkroppens homogenitet

Den uppmätta skenbara resistiviteten på dammkroppen för elektrodkombinationer som ger ungefär samma mätvolym vad beträffar storlek och djupnedträngning kommer att avspegla inhomogeniteter i dammkroppens materialsammansättning och dess geometri. Till det senare hör framförallt djupet till den högresistiva berggrundsytan.

I figur 7.2 redovisas skenbara resistiviteter längs dammkroppen för elektrodkombinationer a6-m2, a7-m3, a8-m4 osv vid olika tidpunkter. Elektrodkombinationerna innebär att resistiviteten mäts med stor vinkel mot dammkroppens längsaxel. 3-D-modellering har visat att denna geometriska koppling mellan elektrodkonfiguration och tåtkärna, ger upphov till den högsta responsen vad beträffar resistivitetsförändringar som kan kopplas till skadezoner i tåtkärnan (Triumf och Thunehed, 1992). Resistivitetsmätningar med elektroderna lokaliserade parallellt med dammens längsaxel ger alltså enligt vår tidigare studie en lägre teoretisk respons för en skada som skär ungefär vinkelrät mot dammens längsaxel.

Följande kommentarer kan göras till resultaten i figuren:

- De låga resistiviteter mellan 450 och 600 beror troligen på att dammen är som högst och bredast här, vilket ger en samlad stor volym av lågresistiv tåtkärna.
- Ett lågresistivt område förekommer vid 300 under försommaren 1994. Detta skulle kunna tolkas så att flödet i omgivningarna är större än i den lågresistiva zonen, dvs att kallt "vinter"-vatten satt ned temperaturen i zonens omgivning. Resultaten är dock inte entydiga om jämförelser görs med andra tidsperioder.
- Resistiviteten sjunker allmänt under hösten 1994 trots sjunkande vattenstånd och temperatur, vilket är motsägelsefullt. En möjlig förklaring är att höstregn gett upphov till sänkt resistivitet i stödfyllningen.



Figur 7.2. Skenbar resistivitet längs dammkroppen för elektrodkonfigurationerna a6-m2, a7-m3, a8-m4 osv vid olika tidpunkter.

Resistivitetsdata för de kombinationer där strömelektroden i inspektionsbrunnarna används, medger analys av förhållandena vintertid. Strömelektrod a4 visar där intressanta resultat. Vid samma vattenstånd i dammen i februari 1994 respektive i juli 1994, erhöles de högsta resistiviteter i juli. Detta kan enbart tolkas som en påverkan av förhållandena i tät kärnan. Strömelektroden ligger i samma område som en av de tidigare omnämnda SP-anomalierna.

I avsnitten 7.2 till 7.3 ovan har kvantitativa och kvalitativa diskussioner förts om olika faktors inverkan på resistiviteten. Av figur 7.1 ovan framgår det klart att vi uppmäter stora variationer i skenbar resistivitet under en årscykel, ofta är variationen flera tusen ohm. Variationerna i resistivitet i tät kärnan som kan tyda på inre erosion förväntas vara små, vilket innebär att geofysikern ställs inför problemet att finna en liten signal som överlagras en stor. I dagsläget anser vi inte detta vara möjligt vad gäller resistivitetsdata från Suorvadammen.

Sammanfattningsvis har vi funnit att resistivitetsdata påverkas av för många variabler för att inverkan av någon enskild skall kunna identifieras entydigt. Inget av de anomala utströmningsområden som identifierats i SP-mätningarna, har hittills kunnat spåras som en entydig inhomogenitet i resistivitetsdata. Vår förhoppning är dock att kunskaperna om olika faktors påverkan på resistiviteten, och därmed möjligheten att isolera de enskilda bidragen, skulle öka i en förlängd mätserie.

7.5. Resistivitetsdata som stöd för tolkning av SP-data

Fitterman (1979) visar hur SP-anomalier över vertikala kontakter påverkas av resistiviteten i de angränsande volymerna. Sammanfattningsvis visar hans arbete att anomalierna över kontakterna är antisymmetriska, där anomaliamplituden är större på den högresistiva sidan. Vid kvantitativ modellering av SP krävs därför resistivitetsinformation.

8. AVBROTT OCH STÖRNINGAR

I samband med att data hämtas per modem från systemet görs alltid kontroller av systemfunktion. Om det visar sig att fel har uppkommit under den senaste mätperioden, kan ofta ett antal möjliga felorsaker redan i detta skede isoleras. Givetvis är detta till nytta vid den efterföljande felsökningen/felavhjälpningen på plats.

Under mätperioden har ett antal avbrott i mätningarna skett. Orsakerna sammanfattas nedan:

- Kabelbrott. Dessa har orsakats av gnagare (hare), fallande stenar, bormaskin.
- Kyla. Gäller främst resistivitetsmätning där strömutsändning hindrats av tjäle.
- Åsknedslag. Drabbade systemet i juli 1994. Förstörde närmare 40 brytarkontakter, omkopplingsboxen samt delar av datorn.

Störningar och/eller försämrade datakvalitet, som har orsakats av systemet eller driften av det har utgjorts av:

- Felaktig inställning av insamlingsparametrar. Intrimning har successivt förbättrat datakvaliteten, vad gäller SP-data.
- Felaktigt konstruerat åskskydd. Ett åskskydd som innebar att samtliga elektroder kopplades på ett visst sätt, medförde uppladdningsfenomen vilka påverkade SP-mätningen negativt. Detta har åtgärdats.
- Funktionsfel i brytarkontakter. Dessa har bytts ut.

9. SLUTSATSER

Driftssäkerheten hos det utvecklade och installerade försökssystemet har varit relativt god. Datakvaliteten under den tjälfria delen av året har varit mycket god. Under den tjälade perioden har den varit nedsatt, främst i resistivitetsdata då majoriteten av strömelektroderna ej förmått utsända tillräckligt stark ström.

Fördelar med systemet är att mätningar kan utföras med stor täthet i tid och rum, samt att systemet kan skötas per modem. Systemdesign och komponentval ger stor flexibilitet vad gäller anpassning till de olika förutsättningar som råder på olika dammar.

Tolkningen av SP-data ger 4 områden med avvikande strömningspotential vilka förekommit under hela projektiden. Anomalierna tolkas indikera inhomogeniteter i vattenströmning genom dammkroppen. Under vintern 93/94 tolkas ytterligare ett område med anomal strömning ha tillkommit.

Resistivitetsdata på denna damm påverkas av för många variabler för att inverkan av någon enskild skall kunna identifieras entydigt. Inget av de anomala utströmningsområden som indikerats av SP-mätningarna, har hittills kunnat spåras entydigt i resistivitetsdata.

En studie av SP-anomaliens koppling till metallskrot visar att skrotet generellt endast framkallar relativt små anomalier. En kraftig negativ SP-anomali i den centrala delen av dammen har dock sin övre källa på ringa djup under dammytan, det kan därför inte uteslutas att den är orsakad av metallskrot.

Bra modelleringsverktyg både för SP- och resistivitetsdata krävs. Vidare krävs bättre kunskap om de fysikaliska egenskaperna hos dammar, dvs indata till modellerna. Detta möjliggör analyser av kvantitativ karaktär i större grad än vad som utförts i detta projekt. På Högskolan i Luleå pågår kvantifiering av parametrar relaterade till strömningspotential i bl a moräner (Friborg, 1995). Även studier av tatkärnans resistivetsreaktion på förändringar i vattentemperatur och joninnehåll bör utföras i laboratoriemiljö.

Resursramarna inom detta projekt medger inte en djupare analys än den presenterade. Det är önskvärt att fortsätta mätningarna och analysarbetet. Därmed torde förståelsen och diagnosnivån i tolkningen av resistivitetsdata öka. Därtill tror vi också att en sluten magasinssnivåcykel kommer att medverka.

10. REFERENSER

Arandjelović, D., 1986, *Resistivity method applied to the investigation of earth embankments*. FIRST BREAK Vol 4, No 3.

Bogoslovsky, V. A., 1970, *Applications of geophysical methods for studying the technical status of earth dams*. Geophysical Prospecting, p. 759-773.

Corwin, R. F., 1988a, *Data quality for engineering self-potential surveys*: Proc. Internat. Symp. on Detection of Subsurface Flow Phenomena, Karlsruhe, Federal Republic of Germany.

Corwin, R. F., 1988b, *Geotechnical applications of the self-potential method*, Rep. 3, Development of self-potential interpretation techniques for seepage detection: Tech. Rept. REMR-GT-6, U.S. Army Engr. Waterways Exp. Station.

Corwin, R. F., and Hoover, D. F., 1979, *The self-potential method in geothermal exploration*: Geophysics, 44, 226 - 245.

Ernstson, K., and Scherer, H. U., 1986, *Self-potential variations with time and their relation to hydrogeological and meteorological parameters*: Geophysics, 51, 1967 - 1977.

Fitterman, D. V., 1979, *Calculation of self-potential anomalies near vertical contacts*. Geophysics, Vol. 44, No 2.

Friborg, J., 1995, *Muntlig kommunikation*. Del i pågående doktorsarbete på Högskolan i Luleå.

Grün, O., 1994, *Self-Potential and Magnetic Anomalies on a Dam*. Examensarbete på Högskolan i Luleå, Avdelningen för tillämpad geofysik.

Johansson, S., 1991, *Localization and quantification of water leakage in ageing embankment dams by regular temperature measurements*. Särtryck ur Dix-septième Congrès des Grands Barrages Vienne, 1991. Commission Internationale des Grands Barrages.

Johansson, S., och Dahlin, T., 1994, *Övervakning av tät kärnans funktion genom analys av resistivitetsvariationer*. VASO dammkommitté rapport nr 24, 1995.

Johansson, S., Bartsch, M., Landin, O., Barmen, G., Dahlin, T., Ulriksen, P., 1995, *Nya metoder för övervakning och undersökning av fyllningsdammar*. VASO dammkommitté rapport nr 21, 1995.

MacInnes, D. A., 1961, *The principles of electrochemistry*: Dover, New York.

McNeill, J. D., 1980, *Electrical Conductivity of Soils and Rocks*. Geonics Ltd. Technical Note, TN-5.

Merkler, G.-P., Militzer, H., Hötzl, H., Armbruster, H., Brauns, J., 1989, *Detection of Subsurface Flow Phenomena, Lecture Notes in Earth Sciences*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York London Paris Tokyo Hong Kong.

Nourbehecht, B., 1963, *Irreversible thermodynamic effects in inhomogeneous media and their applications in certain geoelectric problems*: Ph. D. Thesis, Mass. Inst. Technol., Cambridge.

Ogilvy, A. A., Ayed, M. A., and Bogoslovsky, V. A., 1969, *Geophysical studies of water leakage from reservoirs*: Geophys. Prosp., 17, 36 - 62.

Overbeek, JThG, 1952, *Irreversible systems*. In: Kruyt HR (ed) Colloid science, vol 1. Elsevier, New York.

Sill, W. R., 1983, *Self-potential modeling from primary flows*. Geophysics, Vol. 48, No. 1.

Sowers, G. F., 1977, *Earth dam failures*. Seminar on failures of large dams. Lectures. Technische Hochschule, Aachen, Institut für Grundbau, Bodenmechanik, Felsmechanik und Verkehrswasserbau, Publ. 4, pp. 178 - 226.

Triumf, C-A, Thunehed, H., 1992, *Automatisk bevakning av tät kärnan i dammar genom statistisk analys av geofysiska mätdata*. Fas 1 – Förstudie. Rapport till Norrbottens Forskningsråd.

Wilt, M. J., and Corwin, R. F., 1988, *Numerical modeling of SP anomalies due to leaky dams - Model and field examples*: Proc. Internat. Symp. Detection of Subsurface Flow Phenomena, Karlsruhe, Federal Republic of Germany.

11. APPENDIX 1

Utdrag ur examensarbetet

"Self-Potential and Magnetic Anomalies on a Dam"

av Olivier Grün

Juni 1994, Höskolan i Luleå. Avdelningen Tillämpad Geofysik.

30 sidor, 27 figurer

ABSTRACT

The Self Potential on a monitored earth dam has shown large anomalies whose sources did not seem to be the streaming potential due to the water flow within the dam. Spurious objects like rods or bigger metallic objects were characterised by a magnetic survey on the dam. The SP measurements were performed with the fixed-base configuration ; the station spacing was five metres and that allowed us to find short wave anomalies. The comparison between SP and vertical gradient maps showed spatial correlations between these two. The great majority of the short wave vertical magnetic gradient anomalies were correlated with short wave SP anomalies ; the amplitude of these last is mainly a function of the ground resistivity and thus is greater in winter when the ground is frozen. Buried metallic objects were found to act as "relays" of the streaming potentials by channeling the current lines through them because of their low resistivity. The hypothesis of the occurrence of electrochemical potential involving a vertical metallic object was discussed and rejected, hence no large wave SP anomaly is created by metallic objects in the dam.

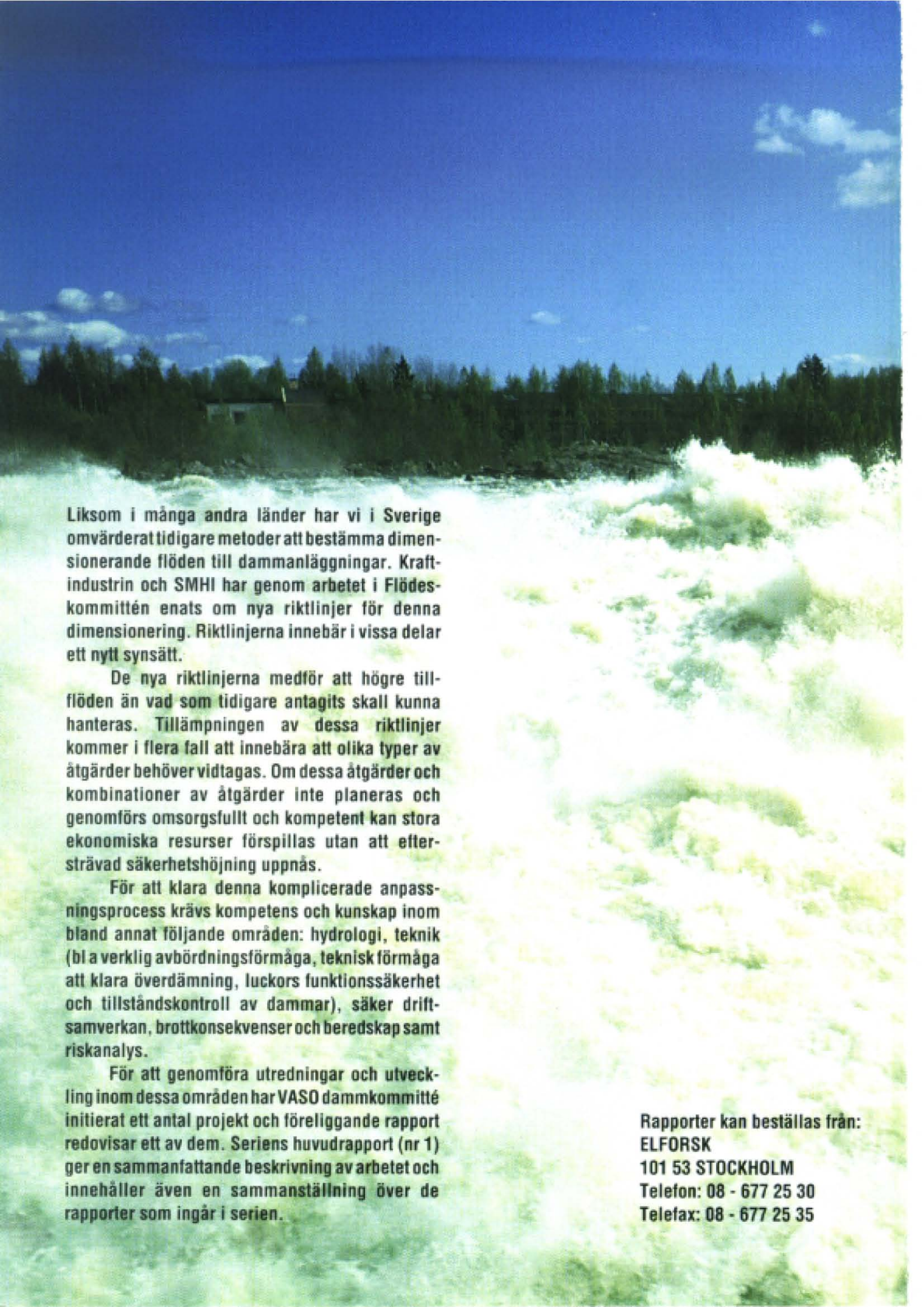
ANTECKNINGAR

ANTECKNINGAR

ANTECKNINGAR

ANTECKNINGAR

ANTECKNINGAR



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

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

För att klara denna komplicerade anpassningsprocess krävs kompetens och kunskap inom bland annat följande områden: hydrologi, teknik (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