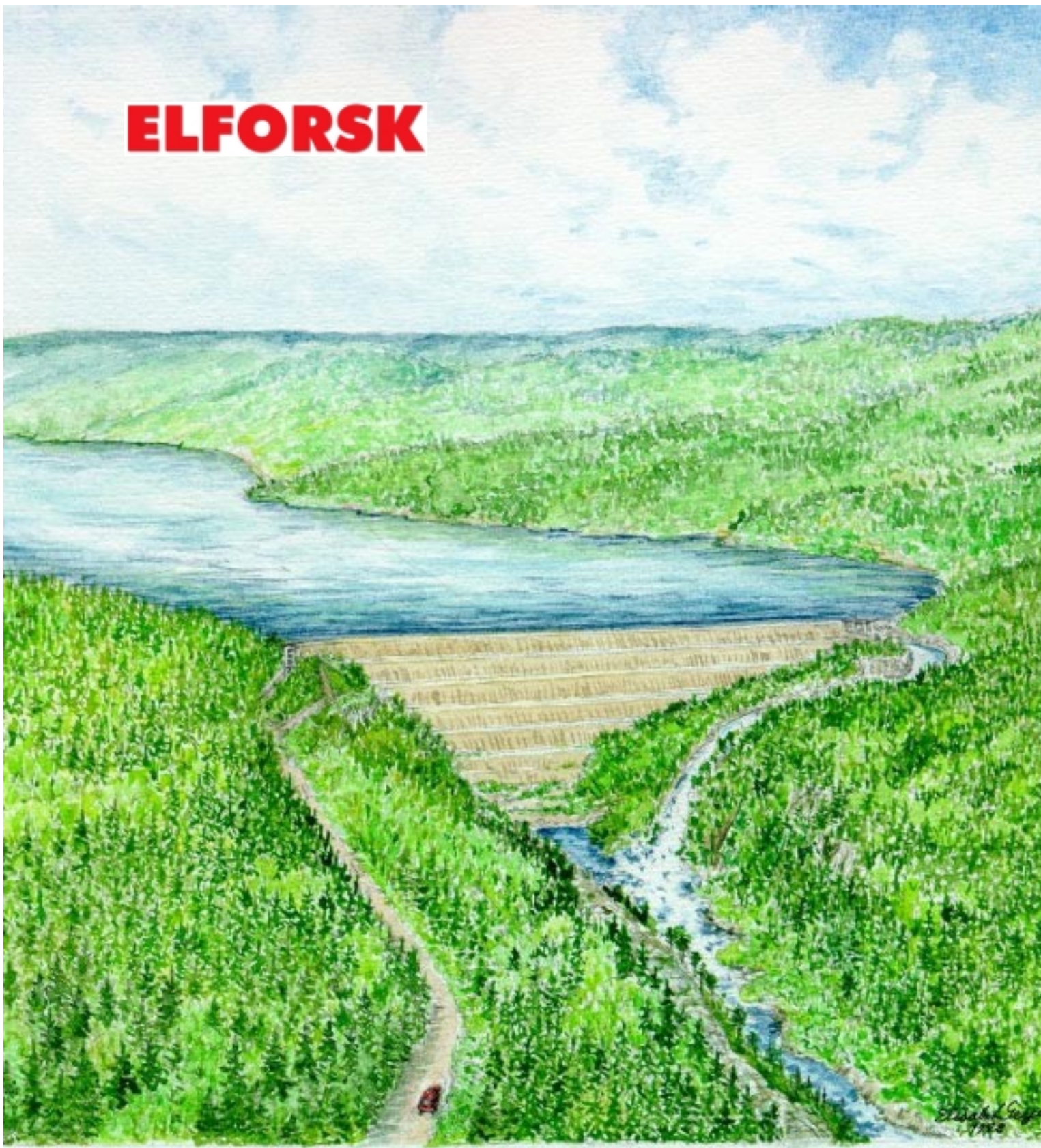


ELFORSK



DAMMSÄKERHET

Övervakning av läckage i fyllningsdammar genom resistivitetsmätning

Rapport 99:8

Övervakning av läckage i fyllningsdammar genom resistivitetsmätning

Elforsk rapport 99:8

**Sam Johansson
Torleif Dahlin**

April 1999

Övervakning av läckage i fyllningsdammar genom resistivitetsmätning

Elforsk rapport 99:8

**Sam Johansson
Torleif Dahlin**

FÖRORD

Denna rapport är ett delresultat inom Elforsk ramprogram Dammsäkerhet.

Kraftindustrin har traditionellt satsat avsevärda resurser på forsknings och utvecklingsfrågor inom dammsäkerhetsområdet, vilket har varit en förutsättning för den framgångsrika utvecklingen av vattenkraften som energikälla i Sverige.

Målen för programmet är att långsiktigt stödja branschens policy, dvs att:

- Risker för allvarliga dammbrott skall praktiskt taget elimineras.
- Risker för dammskador och driftstörningar skall hållas på lägsta rimliga nivå.
- Om skada trots allt inträffar, skall beredskap finnas där handlingsprogram upprättats och konsekvenser utretts på förhand.

Prioriterade områden är Teknisk säkerhet, Operativ säkerhet och beredskap samt Riskanalys.

Ramprogrammet har en styrgrupp bestående av: Malte Cederström - Vattenfall Vattenkraft, Anders Isander – Sydkraft Vattenkraft, Lennart Markland – Vattenregleringsföretagen, Urban Norstedt - Vattenfall Vattenkraft, Gunnar Sjödin – Vattenregleringsföretagen samt Lars Hammar - Elforsk

Sammanfattning

Ett system för dammövervakning baserat på automatisk resistivitetsmätning har utvecklats och installerats i Hällbydammen. Mätssystemet fungerar stabilt och ger dagliga mätresultat sedan över ett år. Programvara i prototyputförande har utvecklats som möjliggör mer eller mindre helt automatiserad bearbetning av mätdata i framtida system.

Sammanlagt har 102 elektroder installerats på dammen varav 43 st på dammens krön, 21 st vid nedströmsfoten samt 38 st på dammens uppströmssida med hjälp av två undervattenskablar. Avståndet mellan elektroderna är sju meter. Mätarrangemanget medför stor flexibilitet och flera typer av resistivitetsundersökningar kan göras. Elektroderna används också för mätning av självpotential.

Datakvaliteten är hos obearbetade mätdata otillfredsställande, men genom tidbasfiltrering kan datakvaliteten förbättras vilket resulterar i relativt tillfredsställande data förutom för höger dammkrön. Ytterligare vägar till förbättring av datakvaliteten torde vara dels mättekniska där bland annat bättre elektrodkontakt på dammkrön ingår, dels olika former av mera intelligent databearbetning.

Utvärderade resistiviteter visar en säsongsvariation som är en funktion av vattenströmningen genom dammen. Mätfelen är i vissa fall (speciellt vintertid på höger dammkrön) större än förmodad säsongsvariation vilket försvårar utvärderingen av vattenströmningen genom dammen. Detta gäller speciellt för en automatisk utvärdering. I de sektioner där mätnoggrannheten är tillfredsställande har automatisk utvärdering kunnat göras med rimliga resultat som följd. Det är dock tveksamt om mätningarna har sådan stabilitet att ett automatiskt system för utvärdering av resultaten kan installeras baserat på det första årets erfarenheter. För att kunna erhålla ett helt automatiskt system för läckageövervakning behöver både mät- och utvärderingsmetodiken utvecklas ytterligare.

Mätningen av SP-data tycks ge resultat som är relativt stabila efter medianfiltrering, vilket är lovande med tanke på att SP-data blir ”bonus” som man kan få från resistivitetsmätsystemet. Det stabila resultatet är också intressant eftersom SP-mätningar helst bör utföras med icke-polariserbara elektroder, vilket ej varit fallet här.

Trots de mättekniska problem som förekommit (speciellt på höger dammkrön) styrker mätningarna de resultat som erhållits vid de tidigare mätningarna från Lövön och Moforsen, nämligen att:

- en säsongsvariation har observerats vilken beror av läckaget genom dammen,
- mätmetoden kan användas för att registrera vattenströmningen genom en damm,
- vattenströmningen i vissa fall kan kvantifieras, samt att
- metoden kan installeras i befintliga dammar för kontinuerlig mätning utan alltför stora ingrepp.

Metoden kan därför i framtiden bli ett alternativ för läckagemätning i dammar där konventionell flödesmätning ej går att genomföra.

Summary

A system for dam monitoring based on continuous resistivity monitoring was developed. The monitoring system was installed in Hällby embankment dam and has shown good reliability with daily results since October 1996. Monitoring software was also developed, which can be further developed to include automatic evaluation of data.

There are in total 102 electrodes installed on the dam, of which 43 are installed on the crest and 21 on the downstream toe. The remaining 38 electrodes are installed in the reservoir on the dam upstream face, using underwater cables. The distance between each electrode is seven meters. The measuring layout gives a high flexibility and several types of resistivity measurements can be performed. The system is also used for monitoring of streaming potentials (SP).

The quality of the daily data have so far been unsatisfactory for the land based electrode layouts, with sometimes a large scattering between the daily measurements, whereas the underwater electrodes provide data of excellent quality. The reason for this is still not fully known, but a major reason is the high electrode contact resistance. The data quality can, however, be improved by time base filtration, through calculation of median-values over one or two weeks. This gives acceptable or good quality for all measuring profiles except for the dam crest on the right dam. Other possible ways to increase the accuracy may be to improve the electrode contact (allowing higher current to be sent out) and develop more intelligent data processing.

Evaluated resistivities (based on the one- or two- weeks median value) show a seasonal variation, which is a function of the seepage through the dam. Measured values show in some case larger variation than the seasonal variation in the reservoir water resistivity, especially during winter at the right dam crest. This complicates the evaluation of the seepage through the dam, especially if an automated evaluation is adopted. Automated evaluation was done for some sections where stable and reliable result were obtained. Hence, the overall results and experience do not allow an installation of an automatic monitoring and evaluation system yet. However, both monitoring and evaluation methods can be improved and such a system seems to be possible to achieve in the future.

The results from the monitoring of streaming potential (SP) seem to have good quality, even if time base filtration through calculation of median-values has to be used also in this case. The result is promising because SP-data is a kind of bonus, given from the resistivity monitoring system. The stable result is notable because non-polarisable electrodes are normally considered mandatory for SP-measurements, which were not used in this case.

Despite the data quality difficulties, especially on the crest on the right dam, the results support the conclusions from the earlier resistivity measurements at the embankment dams at Lövön and Moforsen, i.e.:

- a seasonal resistivity variation occurs in the dam which is caused by the seepage,
- continuous resistivity measurements can be used to locate areas with anomalous seepage through the dam, while single measurements have to be interpreted carefully,
- the seepage may be possible to estimate, and

- the method can be adopted in existing dams.

The method may therefore be an alternative for seepage monitoring in old dams, without seepage monitoring systems or where conventional seepage monitoring is complicated. The latter is for example the case when the downstream water level reaches the dam toe.

Innehållsförteckning

	Sida
1 BAKGRUND.....	11
2 GRUNDLÄGGANDE MÄTPRINCIPER.....	13
2.1 RESISTIVITETSMÄTNINGAR I JORD OCH BERG.....	13
2.2 MÄTUTFÖRANDE	14
2.3 RESISTIVITETSVARIATIONER I Fyllningsdammarna	16
3 BESKRIVNING AV HÄLLBYDAMMEN	19
4 BESKRIVNING AV MÄTSYSTEMET	21
4.1 MÄTUTRUSTNING	21
4.2 KABLAGE.....	23
4.2.1 <i>Elektrodkablar</i>	23
4.2.2 <i>Fjärrkablar</i>	23
4.3 ELEKTRODER.....	23
4.3.1 <i>Markelektroder</i>	23
4.3.2 <i>Undervattenselektroder</i>	24
4.3.3 <i>Åskskydd</i>	24
4.4 MÄTNINGAR	24
4.4.1 <i>Mätstrategi</i>	24
4.4.2 <i>Programvara</i>	25
4.5 MÄTKONFIGURATIONER.....	25
4.5.1 <i>Wenner</i>	25
4.5.2 <i>Pol-dipol</i>	26
4.5.3 <i>Schlumberger-Wenner</i>	26
4.5.4 <i>Andra resistivitetskonfigurationer</i>	26
4.5.5 <i>Självpotential (SP)</i>	26
5 DATABEARBETNING OCH TOLKNING.....	27
5.1 BEARBETNING AV MÄTDATA	27
5.1.1 <i>Tidbasfiltrering</i>	27
5.1.2 <i>Djuptolkning</i>	27
5.1.3 <i>Grafisk presentation</i>	27
5.2 UTVÄRDERING AV FLÖDE	27
5.2.1 <i>Fasförskjutning</i>	28
5.2.2 <i>Amplitud</i>	29
6 RESULTAT - UTVÄRDERADE RESISTIVITETER OCH FLÖDEN.....	31
6.1 MAGASINET.....	31
6.2 HÖGER DAMM UPPSTRÖMS	32
6.2.1 <i>Resistivitet</i>	32
6.2.2 <i>Diskussion</i>	34
6.3 HÖGER DAMMKRÖN	35
6.3.1 <i>Resistivitet</i>	35
6.3.2 <i>Vattenströmning</i>	37
6.3.3 <i>Diskussion</i>	38
6.4 HÖGER DAMM NEDSTRÖMS.....	38
6.4.1 <i>Resistivitet</i>	38
6.4.2 <i>Vattenströmning</i>	42
6.4.3 <i>Diskussion</i>	43
6.5 VÄNSTER DAMM UPPSTRÖMS	43
6.5.1 <i>Resistivitet</i>	43

6.5.2	<i>Diskussion</i>	44
6.6	VÄNSTER DAMMKRÖN	44
6.6.1	<i>Resistivitet</i>	44
6.6.2	<i>Vattenströmning</i>	48
6.6.3	<i>Diskussion</i>	48
7	MÄTNINGAR AV SJÄLVPOTENTIAL	49
8	DISKUSSION/UTVECKLINGSPOTENTIAL	53
8.1	RESULTAT	53
8.2	MÄTKVALITET	53
8.3	MÄTMETODIK	54
8.4	DATABEARBETNING	54
8.5	DATAPRESENTATION	57
8.6	SJÄLVPOTENTIAL (SP)	57
9	SLUTSATSER	59
10	REFERENSER	61
11	BILAGOR	63

1 Bakgrund

Internationella erfarenheter (ICOLD 1983 och 1995) visar att det finns ett behov av att utveckla metoder och mätmetodik för läckageövervakning i fyllningsdammar. För att uppnå detta är det önskvärt att få fram metoder som kan registrera små förändringar i dammen, dvs sådana som i ett tidigt skede kan registrera förändringar. En lämplig metod för detta är temperaturmätningar, vilka utförs regelbundet i ett flertal dammar. Temperaturen mäts i vattenståndsrör. Sådana mätningar är representativa för ett mindre område i dammen, vilket i vissa fall ej är tillfyllest. De årliga temperaturvariationer som vattenströmningen genom en damm medför påverkar även resistiviteten i dammen under året. Resistivitetsmätningar kan utföras utmed hela dammens längd. Resultatet användas för att lokalisera områden med förhöjd vattenströmning samt även kvantifiera densamma.

Regelbundna resistivitetsmätningar i dammar har utförts sedan 1993 vid tre dammar i Sverige, Triumf et al (1995) samt Johansson och Dahlin (1995). De resultat och erfarenheter som erhållits har varit lovande. Det har också framkommit att både mät- och utvärderingstekniken behöver utvecklas vidare. Detta är bakgrunden till detta projekt som har utförts av Sam Johansson, HydroResearch och Torleif Dahlin, LTH, Inst. för Geoteknologi. Jonas Birkedahl, Gullspångs Kraft AB har ansvarat för samordning mellan Gullspångs Kraft ABs driftsorganisation och projektet. Driftpersonalens aktiva medverkan har underlättat vårt arbete och deras insats har varit betydelsefull och i hög grad bidragit till mätsystemets höga tillgänglighet.

Projektet har finansierats av VASO, via Elforsk AB och av Gullspångs Kraft AB. En referensgrupp bestående av Malte Cederström, Vattenfall AB Vattenkraft, Harald Eriksson, Båkab AB samt Lars Hammar, Elforsk AB har följt projektet och bidragit med värdefulla kommentarer och synpunkter.

Projektet startade våren 1996 och mätsystemet installerades i Hällbydammen under sommaren samma år. Efter några månaders inledande mätproblem togs anläggningen i drift under oktober månad 1996. Denna rapport redovisar första årets mätningar, samt de utvärderingar som gjorts. Det insamlade resultatet möjliggör dock ytterligare bearbetning, vilket förhoppningsvis kommer att ske om projektet kan förlängas.

2 Grundläggande mätprinciper

2.1 Resistivitmätningar i jord och berg

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), Dahlin (1993) och Johansson et al. (1995).

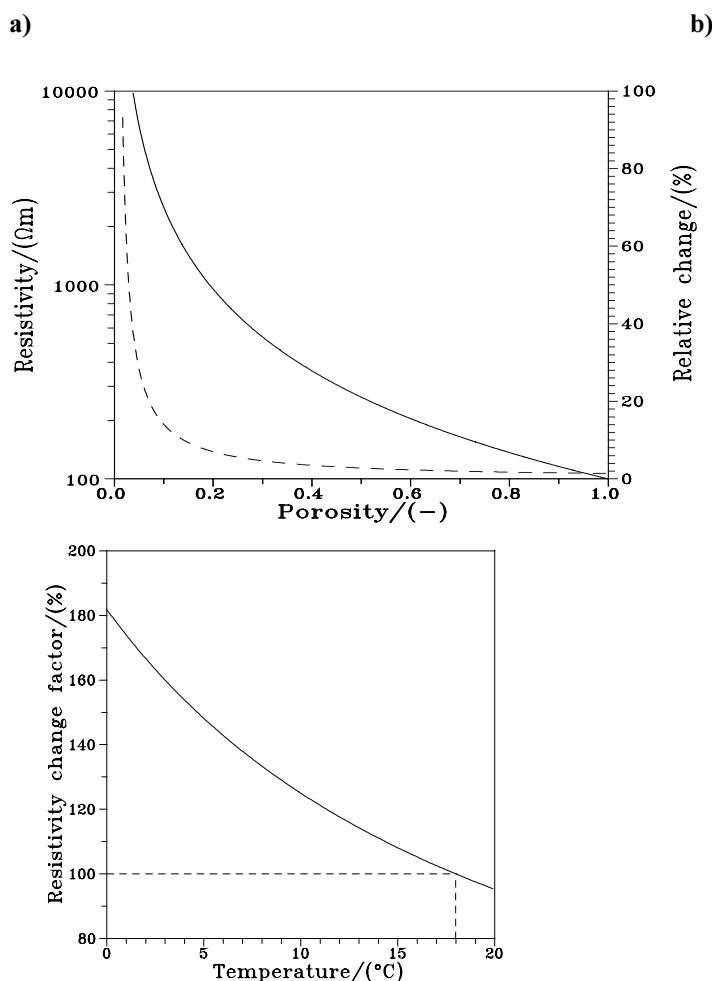
Eventuellt lerinnehåll ger stor påverkan på resistiviteten, och lerhaltiga och organiska jordar har normalt låga resistiviteter. För lerfritt material, egentligen lerfritt sedimentärt berg, ger Archies lag ett enkelt samband mellan resistivitet och porositet:

$$\rho_f = \rho_v a n^{-m} \quad \text{Ekv. 1}$$

där ρ_f = formationens resistivitet, ρ_v = 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 1a 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.

Resistiviteten är vidare beroende av temperaturen, vilket framgår av diagrammet i Figur 1b. 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 jorrdammar är dock den säsongsmässiga temperaturvariationen i dammen så stor att den bör beaktas. Som framgår av Ekv. (1) är också resistiviteten direkt proportionell mot joninnehållet i vattnet. Vid flertalet resistivitmätningar antas även joninnehållet vara konstant i tiden, men detta är ej heller korrekt vid mätning på fyllningsdammar. Eftersom båda dessa faktorer beror av vattenströmningen genom dammen bör resistivitetsvariationer vara ett mått av vattenströmningen genom dammen, vilket beskrivs närmare nedan.

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

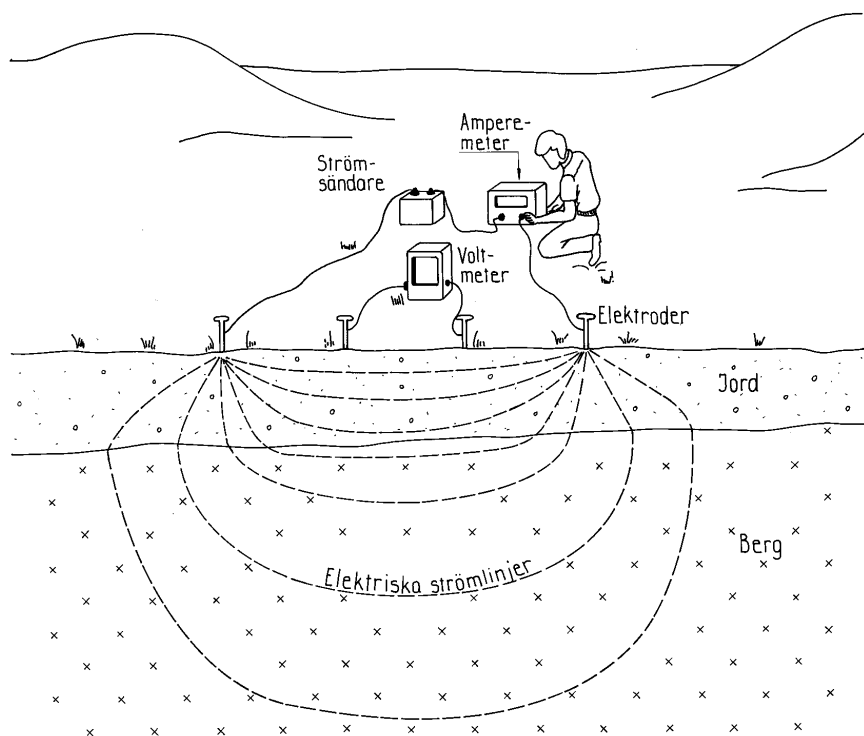


Figur 1 a) Resistivitetsens beroende av porositeten i lerfritt material enligt Archies lag vid $\rho_v = 100 \Omega m$, $a = 1,0$, $m = 1,4$ (heldragen linje, den streckade kurvan anger den relativa förändringen).
 b) Resistivitetsens beroende av temperaturen (temperaturkoefficienten $a = 0,025$).

2.2 Mätutförande

Resistivitetmätning är en geofysisk metod som är känd sedan seklets början, där resistivitet är ett mått på det elektriska motståndet. Metoden har tills nyligen haft relativt begränsad användning på grund av det tidsödande datainsamlings- och tolkningsarbetet. Vid manuell mätning sätter man ut fyra elektroder i markytan, och sänder en ström mellan två av dem samtidigt som man mäter spänningen mellan de andra två (Figur 2). Genom att systematiskt variera avståndet mellan elektroderna, och mittpunkten för uppställningen kan man kartlägga variationerna i resistivitet i marken. Dessa variationer kan sedan kopplas till variationer i utbredning och mäktighet hos olika jord- och bergarter, vattenhalt, föroreningshalt etc. beroende på tillämpning (t.ex. Parasnis 1986; Palacky 1987; Ward 1989; Dahlin 1993).

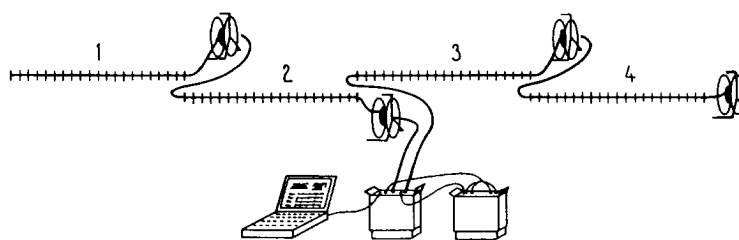
Genom utveckling av mättekniken på senare år finns numera datorstyrda mätsystem som rationaliserar datainsamlingen dramatiskt. Detta möjliggör en effektivitet och detaljering i mätningen som är otänkbar vid manuell mätning. Ett typiskt mätsystem kan bestå av omkopplingsenhet, mätinstrument, dator, kablar och elektroder, samt programvara för datainsamling (se Figur 3). Man sätter ut ett stort antal elektroder (t.ex. ett 60-tal) innan mätningarna börjar varefter datainsamlingsprogrammet sköter mätningen automatiskt. Oftast mäter man längs linjer, med många olika elektrodavstånd, vilket innebär att man kan uppskatta hur resistiviteten varierar mot djupet längs linjen (Dahlin 1993).



Figur 2 *Princip för resistivetsmätning: en kontrollerad ström sänds mellan två elektroder samtidigt som spänningen mäts mellan två andra elektroder (efter Robinson och Coruh 1988). Genom att variera avståndet mellan elektroderna kan djupnedträngningen varieras. Ett modernt resistivetsinstrument innehåller bland annat precisionsvoltmeter, ingångsfilter, strömsändare och microprocessor. I vissa fall har instrumenten också inbyggd persondator och datalagring. Ett typiskt instrument för ingenjörs- och miljötillämpningar kan sända ut upp till 150-400V likström.*

Mätresultaten bearbetas mer eller mindre automatiskt med ett modelltolkningsprogram, och presenteras i form av sektioner i färg eller gråskala som ger en kontinuerlig bild av hur egenskaperna varierar i marken. Dessa resistivetssektioner är förhållandevis lätta att tolka i t.ex. geologiska termer. Under de senaste åren har det skett en stark utveckling av metoderna för bearbetning och tolkning av mätdata, vilket gör att man kraftigt förbättrat möjligheten att tolka resultaten från områden med en komplicerad uppbyggnad av marken. Tolkningsprogrammen genererar en finita differens- eller finita

elementmodell av resistivitetsens fördelning i marken, och anpassar sedan modellresistiviteterne genom ett iterativt förfarande så att avvikelsen mellan modellsvaret och uppmätta data blir så litet som möjligt (Dahlin 1996; Loke och Barker 1996).



Figur 3 Schematisk bild över datorstyrt mätsystem för resistivitetsundersökning (ABEM Lund Imaging System) där varje streck på de skisserade kablarna motsvarar en elektrodposition. I fallet med övervakning användes fast installerade kablar som är permanent anslutna till omkopplingsenheten.

I vissa fall kan det finnas behov av att kartlägga hur markens uppbyggnad varierar mot djupet över en yta, dvs tredimensionell (3D) kartläggning. Detta kan ske genom mätning längs ett antal parallella linjer över ett område, vilket sammanställs till 3D bilder. Alternativt kan man använda en yttäckande strategi redan vid datainsamlingen, och arbete pågår med vidareutveckling av metodik för insamling, bearbetning och tolkning av 3D data. Man kan förvänta sig en relativt snabb utveckling inom 3D teknik under de närmaste åren.

2.3 Resistivitetsvariationer i fyllningsdammar

Som ovan nämnts påverkas resistiviteten i dammen av vattenströmningen genom dammen. Detta vatten har sitt ursprung i magasinet där både vattnets temperatur och joninnehåll varierar säsongvis. När läckagevattnet strömmar genom dammen ändras temperaturen och resistiviteten i dammen enligt de två grundprinciper som beskrivs nedan.

Vattenströmningen sker genom porerna i den vattenmättade delen av dammen. Vattnets hastighet kallas porhastigheten v_n (m/s) och skrivs:

$$v_n = \frac{q}{n} \quad \text{Ekv.(2)}$$

där n betecknar porositeten och q är flödet (m^3/s och m^2). Om ett spårämne eller de naturliga joner som finns i magasinet följer med vattnet kommer det därför att transporteras med porhastigheten.

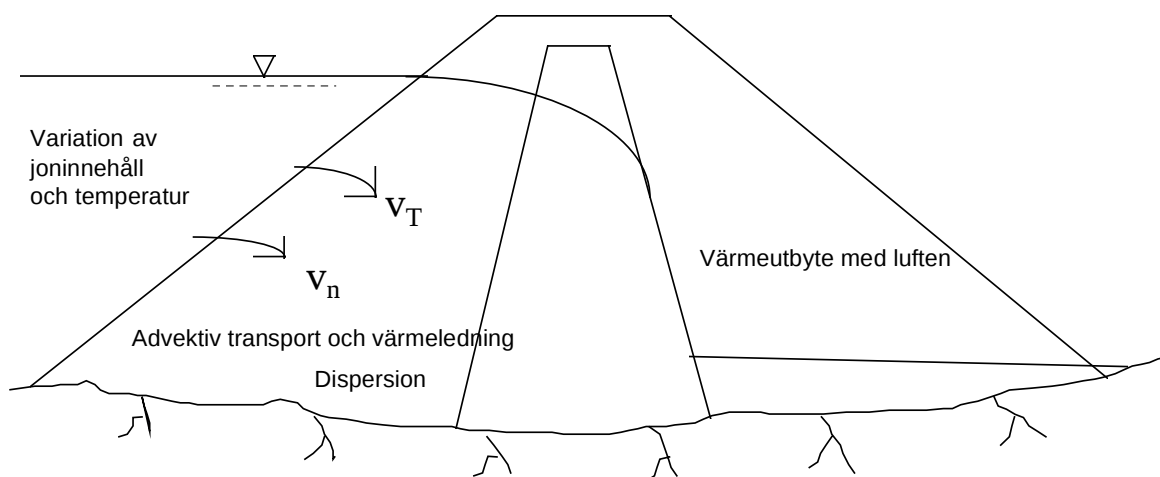
När vatten med avvikande temperatur transporteras med flödet kommer det att följa den termiska hastigheten v_T som definieras enligt Claesson et al (1985):

$$v_T = q \frac{C_w}{C} \quad \text{Ekv. (3)}$$

där C_w är vattnets volumetriska värmekapacitet ($\text{J/m}^3\text{K}$) och C är jordmaterialets volumetriska värmekapacitet. För flertalet jordmaterial är C cirka $2 \text{ MJ/m}^3\text{K}$, medan C_w är konstant $4,16 \text{ MJ/m}^3\text{K}$. I dammar varierar vattenströmningen lokalt varför den största delen av värmetransporten kan förekomma i ett begränsat område där vattenströmningen är högre. Vinkelrätt mot strömningsriktningen sker därför värmeutbyte med omgivande material där vattenströmningen är mindre. Detta innebär att även temperaturpulsen 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 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 vilket illustreras i Figur 4. Dessutom tillkommer värmeledning samt mekanisk och termisk dispersion. I vissa fall kan också kemisk utlösning av mineraler förekomma, vilket kan påverka dammens resistivitet.

Den tidsmässiga variationen av resistiviteten i dammen kan följas genom kontinuerliga resistivetsmätningar. En fullständig tolkning av transportprocessen är som synes komplex. Eftersom resistiviteten beror av joninnehållet och temperaturen möjliggör metoden en kvantifiering av vattenströmningen, vilket beskrivs nedan i avsnitt 5.2.

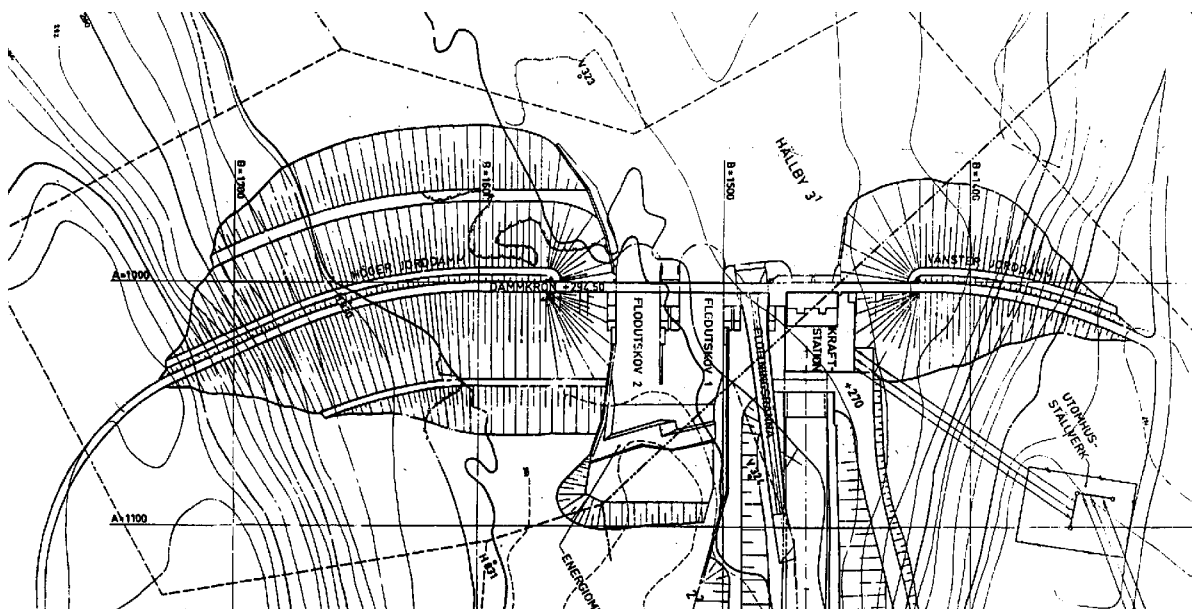


Figur 4 Transportprocesser som påverkar resistiviteten i en fyllningsdamm.

3 Beskrivning av Hällbydammen

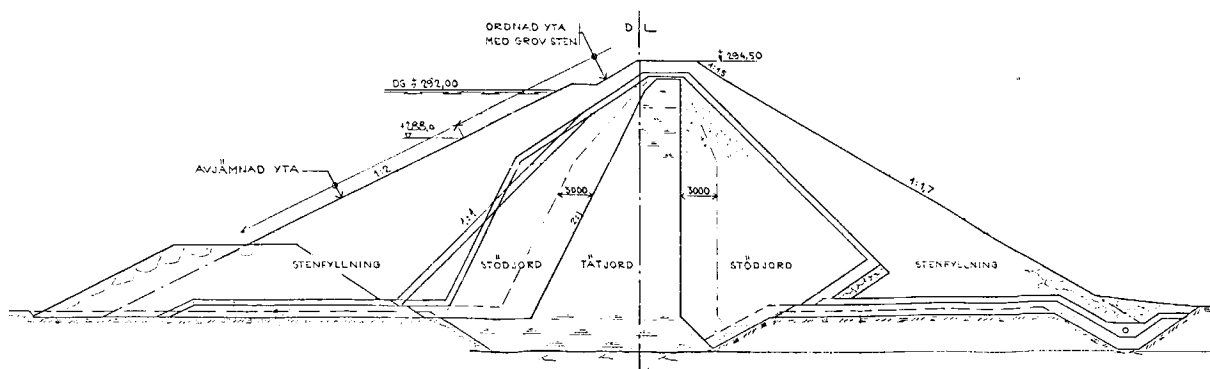
Hällbydammen ligger i Ångermanälven ca 10 mil norr om Sollefteå. Dammen togs i drift 1970 varvid Hällbymagasinet erhöles. Sjöytan är 36 km² och regleringsvolymen ca 29 Mm³. Magasinet används för korttidsreglering med regleringsamplituden 0,8 m. Dämningsgränsen i magasinet är +292,0.

Dammens centrala delar är grundlagda på berg liksom kraftverket och utskovspartiet, vilka delar dammen i två delar, jfr Figur 5. Den vänstra delen är ca 90 m lång varav 40 m är grundlagd på berg. Den högra delen är ca 160 m lång varav ca 120 m är grundlagd på berg. Vid dammens båda anfang har ursprungligt olämpligt material schaktats bort. Dammens anslutning mot befintlig mark vid anfangen lutar ungefär 1:2 i dammlinjen. Som högst är dammen ca 27 m. Dammens krön är beläget på nivån +294,5 vilket är 1,5 m ovanför tät kärnans krön (+293,0). Bergytan är tämligen plan och är belägen mellan +268 och +270.



Figur 5 Översiktsplan över Hällby kraftverk och damm.

Dammen är en traditionell svensk fyllningsdamm med vertikal tät kärna av morän, omgiven av filter, se Figur 6. Tät kärnematerialet har vid borrningar bedömts ha hög täthet. Några bestämningar av dess hydrauliska konduktivitet har ej påträffats med bedöms vara ca 10⁻⁷ m/s eller lägre. Vattenströmningen genom dammen ska därmed vara liten. Berget under tät kärnan injekterades ca 10 m ned i berget då dammen byggdes.

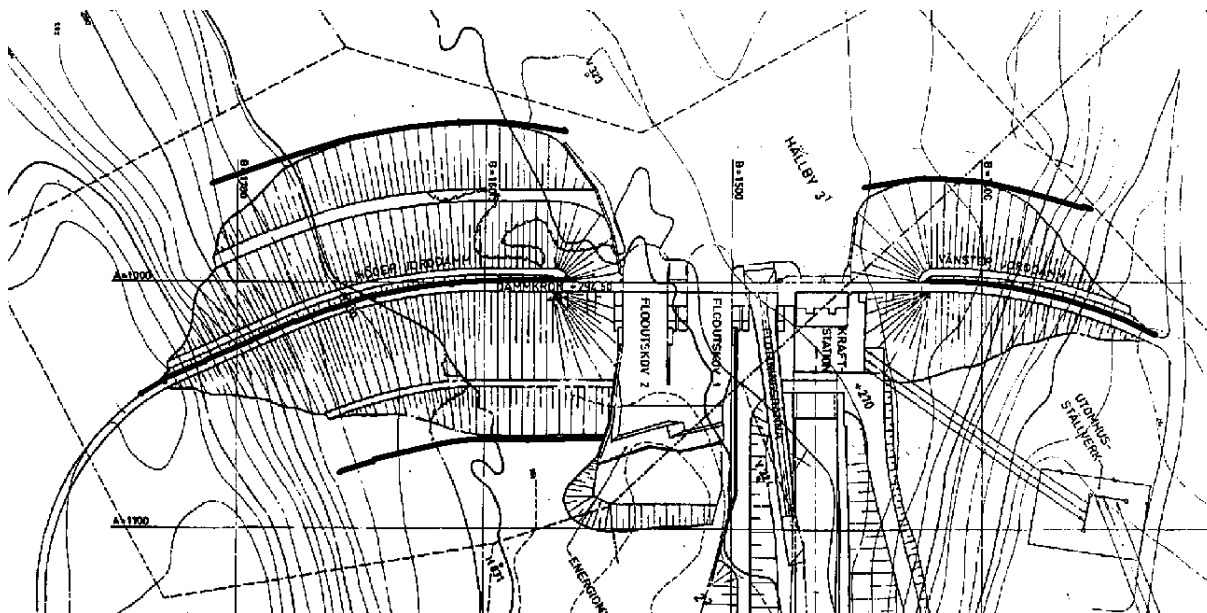


Figur 6 Tvärsektion genom vänster damm vid Hällby kraftverk.

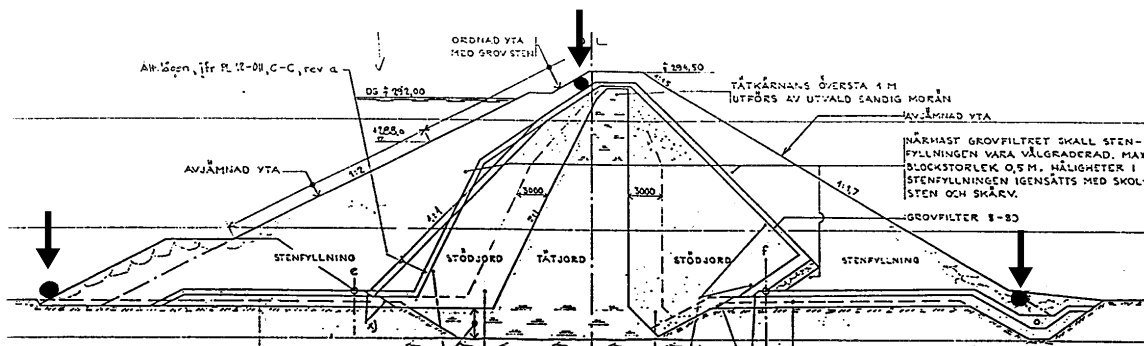
År 1986 upptäcktes ett sjunkhål på dammen intill utskovet. Injektering utfördes vid dammens anslutningar intill utskovet respektive intaget under 1987, både i berg och kontaktzonen mellan berg och tätkärnan samt i tätkärnan. Injektering utfördes både med cement-bentonit samt med kemisk injektering (silikat). I höger damm injekterades totalt ca 150 m³ inom ca 10 m avstånd från utskovet. På vänster sida injekterades ca 250 m³ inom 15 m avstånd från intaget. Några nya problem har ej konstaterats efter denna åtgärd.

4 Beskrivning av mätsystemet

Ett mätsystem för helt automatiserad mätning av resistiviteten har installerats på Hällbydammen, med vars hjälp mätning sker en gång per dygn. Förutom resistivitet mäts även självpotentialer.



Figur 7 Planskiss över elektrodablarnas ungefärliga läge på Hällbydammen.



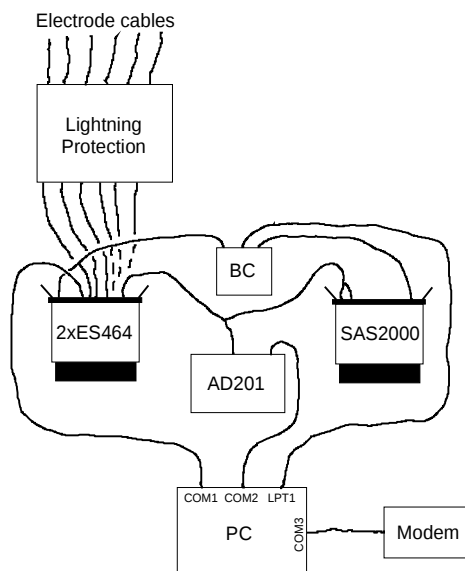
Figur 8 Tvärsektion av höger damm visande elektrodablarnas läge på uppströmssidan, dammkrönet och nedströmssidan. På vänster damm saknas dock elektrodablarna på nedströmssidan på grund av terrängförhållandena.

4.1 Mätutrustning

Mätsystemet är uppbyggt kring ABEM Lund Imaging System, som är en vidareutveckling av ett system utvecklat vid LTH (Dahlin 1993; Dahlin 1996). Ett antal modifieringar och kompletteringar har dock gjorts i hårdvaran i förhållande till standardutförandet av mätsystemet, se systemöversikt i Figur 9. En utförligare beskrivning av mätsystemet återfinnes i Bilaga 1.

Mätsystemet består av:

- 2 st reläomkopplingsenhet ABEM Electrode Selector ES464,
- strömförstärkare ABEM Booster SAS2000,
- styrenhet (Booster Controller) som styr strömförstärkeren,
- voltmeter/AD-omvandlare Lawson Labs AD201,
- 5 st elektrodkablar med 14 (vänster uppström), 16 (vänster krön), 24 (höger uppström), 27 (höger krön) respektive 19 (höger nedström) elektroder,
- 2 st fjärrelektroder (uppströms och nedströms) och 2 st separata elektroder på vänster nedströmssida,
- elektrodkablar med så kallade "pig-tail outlets",
- plattelektroder (på land) och ringelektroder (i vatten),
- åskskydd,
- dator (standard PC med extra serieport),
- modem för fjärrstyrning och dataöverföring,
- tidur som bryter strömmen en gång per dygn för omstart av datorn.



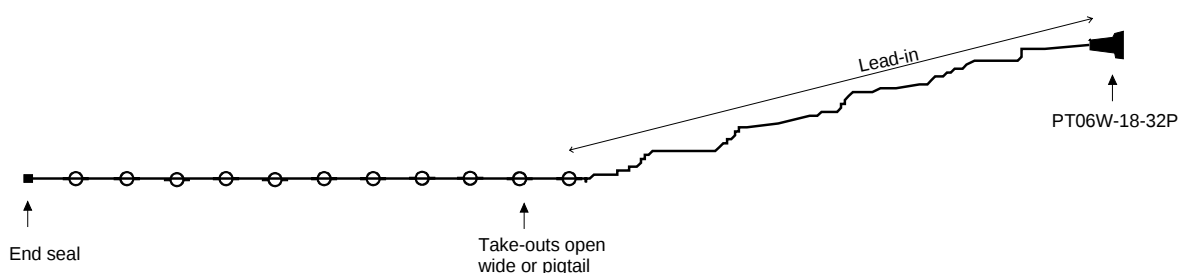
Figur 9 Systemskiss över mätsystemets huvudkomponenter. Varje enhet är försedd med separat strömförsörjning, förutom åskskyddet som är passivt. Vidare ingår ett tidur som bryter strömmen vid midnatt varje dygn. Förklaring till använda beteckningar: ES464 = 2 st omkopplingsenheter, BC = kontroll/styrenhet för strömsändare, SAS2000 = strömsändare, AD201 = voltmeter/AD-omvandlare, PC = dator.

En undervattensprob har konstruerats för mätning av magasinsvattnets temperatur och resistivitet. Proben är ansluten till mätsystemet på samma sätt som elektrodablarna. Resistivitetsdelen består av fyra miniatyrelektroder arrangerade i rad med 20 mm mellan varje, avsedda för mätning med Wennerkonfiguration. Temperatursensorn utgörs av en integrerad krets för temperaturmätningar.

4.2 Kablage

4.2.1 Elektrodkablar

Flerledarkabel med mantel och ledarisolering i polyuretan används för att förbinda elektroderna längs dammen med omkopplingsenheterna, se principskiss i Figur 10. Kablarna är måttbeställda och försedda med gjutna förgreningar, så kallade "pig-tail outlets", till elektroderna med 7 meters intervall. Kablarna har ett varierande antal elektrodanslutningar, och varierande längd på blankkabel för anslutning till omkopplingsenheterna, beroende på deras placering. Ena änden av kablarna är försedd med ett mångpoligt kontaktdon, medan den andra är förseglad.



Figur 10 Principiell utformning av elektrodkablar, där samtliga elektroduttag är utformade som "pig-tail take-outs" i detta fallet.

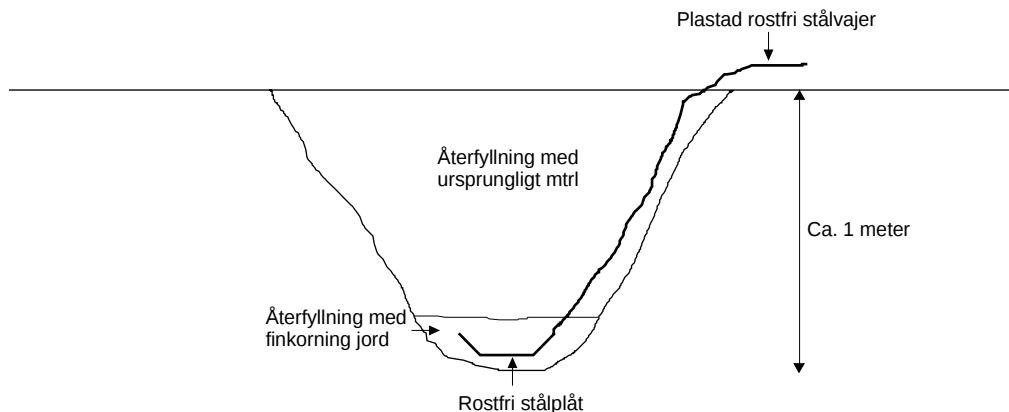
4.2.2 Fjärrkablar

Enkelledarkabel med mantel i polyuretan ansluter fjärrelektroderna till omkopplingsenheterna. Fjärrelektrodkablar har en längd av omkring 1,1 km vardera. Samma typ av kabel användes till de två elektroderna på vänster nedströmssida. Fjärrelektroderna är gjorda i samma utförande som markelektroderna (se nedan).

4.3 Elektroder

4.3.1 Markelektroder

Som markelektroder används 0,25m x 0,25m stora plåtar i syrafast stål, vilka är anslutna till en plastöverdragen tvinnad vajer i syrafast stål. Elektroden är nedgrävda på ett djup av cirka en meter. Installationen skedde med hjälp av traktorgrävare (Figur 11). I botten av varje grop lades finkornigare jordmaterial (finsand/silt), därefter lades stålplattan ned, därefter ytterligare finmaterial. Slutligen återfylldes gropen med ursprungligt material. Före återfyllningen trädde ett plaströr (så kallade elektrikerrör) över vajern för att skydda den mot vassa stenar.



Figur 11 Principskiss som visar hur installationen av markelektroder skett. Före återfyllningen trädde ett stycke så kallade elektrikerrör över vajern för mekaniskt skydd (ej visat i skiss).

4.3.2 Undervattenselektroder

Ringar i syrafast stål tjänar som elektroder på undervattenskablar. Ringarna är anpassade i storlek så de kunnat klämmas fast över elektrodörgreningarna på kablarna. Undervattenskablar med sina elektroder installerades av dykare, och förankrades genom att betongringar fästes vid dem.

4.3.3 Åskskydd

Ett specialanpassat åskskydd har utvecklats för att förhindra att mätutrustningen förstörs av överspänningar. Eftersom upp till 400V skall kunna sändas ut genom åskskyddet har det dimensionerats för 600V för att inte utlösas vid normal drift. Ett extra åskskydd har monterats mellan reläomkopplingsenheterna och voltmeteren, för att skydda voltmeteren mot spänningar över 75V, vilket har byggts in i den grenkabel som förbinder enheterna. Vidare har nät- och teleanslutningen försetts med transientskydd som köpts in färdiga.

4.4 Mätningar

4.4.1 Mätstrategi

Datainsamlingen baseras på daglig mätning enligt ett antal olika mätprotokoll, där datafilerna namnges enligt ett system där de två första tecknen är en namnbas som är knutet till ett eller flera mätprotokoll, och de resterande sex tecknen utgör dagens datum. T.ex. anger filnamnet W1970228 att datafilen uppmättes 1997-02-28 med ett eller flera mätprotokoll knutet till namnbasen W1 (Wennerprotokoll nummer 1 i detta fallet).

Datainsamlingen omfattar mätning av 23 olika datafiler varje dag, nämligen:

- S1-S6 - självpotential för respektive elektrod kabel
- TE - temperatur i magasinsvattnet
- VA - resistivitet i magasinsvattnet
- W1-W6 - resistivitet med Wennerkonfiguration för respektive elektrod kabel (W3 mäts ej på grund av att vänster nedström utgick)

- R1-R6 - resistivitet med reciprok Wennerkonfiguration för respektive elektrod kabel
- C1-C6 - resistivitet med pol-dipolkonfiguration för respektive elektrod kabel (C3 mäts ej på grund av att vänster nedström utgick)
- X1-X6 - resistivitet med Wenner-Schlumbergermätning sedan september 1997.

4.4.2 *Programvara*

En modifierad version av ERIC.EXE (Electrical Resistivity Imaging Control) som används för mätning med ABEM Lund Imaging System har utvecklats för mätning med separat voltmeter/AD-omvandlare, kallad ERIC_AD.EXE. Programmet har också vidareutvecklats så att det kan köras helt automatiskt, normalt sett startas det interaktivt och stannar för vidare instruktioner i vissa mätsituationer, vilket är olämpligt i denna tillämpning. Programmet startas för automatisk körning med exempelvis:

ERIC_AD B/W1970228 S/HWENNER1 LP/40 R/10

vilket anger kommandokörning där data skall lagras under namnet W1970228. Den andra anropsparametern anger att inställningsfilen HWENNER1.SET skall användas, därefter anges parametrar för voltmeters interna databearbetning (om standardinställningen skall frångås).

Datainsamlingsprogrammet startas med hjälp av en kommandofil (batchfil) som genereras varje dag. I kommandofilen anges bland annat vilka filnamn som skall användas. Vidare innehåller kommandofilen anrop av programmet PKZIP.EXE vilket packar ihop alla datafiler från en dag till en komprimerad fil som lämpar sig väl för dataöverföring. Den komprimerade filen ges dagens datum som namn, t.ex. 970228.ZIP.

Kommandofilen genereras av det specialutvecklade programmet MAKE_BAT.EXE, vilket styrs av en skriptfil (t.ex. HAELLBY.SCR). Programmet genererar ett anrop av ERIC_AD.EXE för varje namnbas som används. Exekveringen initieras av AUTOEXE.BAT som startas automatiskt när datorn slås på, vilket sker dagligen med hjälp av ett tidur. Tiduret slår av datorn vid midnatt, och slår på den igen efter femton minuter varpå datainsamlingen startas. Mätningarna pågår sedan till i början på eftermiddagen.

4.5 **Mätkonfigurationer**

4.5.1 *Wenner*

Vid mätningarna har bland annat Wennerkonfiguration använts, vilket är en väl beprövad konfiguration som har förhållandevis god upplösningsförmåga mot djupet men ganska ringa djupnedträngning vid elektrodutlägg med få elektroder. En av de stora fördelarna med konfigurationen är det goda signal-brusförhållandet den ger, vidare är den förhållandevis okänslig för variation tvärs elektrodutlägget, så kallade 3D-effekter (Dahlin och Loke 1997).

Förutom normal Wennerkonfiguration har reciproka mätningar genomförts, vilket innebär mätning där strömelektroder bytt plats med potentialelektroder. Enligt

reciprocitetsteoremet skall detta leda till identiska mätresultat, och genom att utnyttja detta kan man göra uppskattningar av mätfelens storlek (Parasnis 1986).

4.5.2 *Pol-dipol*

Mätning har även genomförts med pol-dipolkonfiguration, som innebär att man har en aktiv strömelektrod i elektrodutlägget och en fjärrelektrod för returströmmen. Båda potentialelektroderna befinner sig inne i elektrodutlägget, till skillnad mot pol-pol-konfiguration som har en fjärrelektrod för potentialmätningen också. Fördelen gentemot Wennerkonfiguration är att den ger större djupnedträngning, men den är något känsligare för 3D-effekter (Dahlin och Loke 1997).

Programvaran för djuptolkning är idag anpassad för att få ut mesta möjliga information av de pol-dipoldata som uppmätts, genom samarbete med tolkningsprogrammets upphovsman M.H. Loke.

4.5.3 *Schlumberger-Wenner*

För närvarande pågår försök med att kombinera Wennermätningarna med Schlumbergermätning. Detta möjliggör ett större totalt antal mätningar på varje elektrodutlägg, vilket ger bättre kontroll över brus i data och kan ge högre upplösning i de tolkade resistivitetsmodellerna. Vidare är djupnedträngningen något större med Schlumbergermätning.

4.5.4 *Andra resistivitetskonfigurationer*

Avsikten var ursprungligen att testa pol-pol-mätning med hjälp av de två fjärrelektroder som lades ut. Då det emellertid visat sig att dessa skadats har det inte varit genomförbart. Vidare tar det mätprogram som genomförs idag så lång tid att ytterligare mätvarianter måste prioriteras hårt.

För att erhålla maximal 3D information kan mätningar som kombinerar elektroder från olika mätlinjer utföras, t.ex. pol-dipol mätning med en strömelektrod på nedströmssidan och potentialelektroderna på dammkrönet och uppströmssidan eller andra liknande kombinationer. Sådana mätningar har ännu ej gjorts på grund av att det ännu ej är möjligt att tolka dessa resultat. Utvecklingen av 3D modellerings- och tolkningsprogram förväntas dock kunna medge detta inom överskådlig tid, varför inledande mättekniska försök är motiverade.

4.5.5 *Självpotential (SP)*

Mätning av självpotential (SP) görs på samtliga elektroder dagligen, med en av elektroderna på uppströmssidan som referenselektrod, mot vilken potentialen vid alla de övriga mäts. Samma elektroder som används för resistivitetsmätningarna används således för SP-mätningen, dvs elektroder i rostfritt stål. Varje dygns mätsekvens börjar med SP-mätningen för att reducera inverkan av polarisationseffekter (uppladdningseffekter) i elektroderna i möjligaste mån.

5 Databearbetning och tolkning

5.1 Bearbetning av mätdata

5.1.1 Tidbasfiltrering

En tidbasfiltrering av inkommande data görs genom att datafilerna för ett antal dagar, till exempel en vecka, läses in och mätresultaten för varje enskild datapunkt sorteras i storleksordning. Därefter beräknas det tidsbaserade medianvärdet för varje datapunkt, och lagras i en ny datafil som används för vidare bearbetning. Detta upprepas för varje tidssteg, för detta exempel varje vecka, under en årscykel. Förfarandet har valts för att undertrycka slumpmässigt förekommande störssignaler som påverkar mätdata. Tidbasfiltreringen görs automatiskt med hjälp av specialutvecklade program.

Tidbasfiltreringen görs av samtliga mätdata, dvs såväl SP-data, som resistivitets- och temperaturdata.

5.1.2 Djuptolkning

Djuptolkningen av resistivitetsdata görs med hjälp av automatisk invers modelltolkning med programmet RES2DINV.EXE, enligt en metod presenterad av Loke och Barker (1996). Genom samarbete med M. H. Loke som utvecklar programmet har vi nu en version som medger kommandoanrop, vilket gör att databearbetningen har kunnat automatiseras i stort sett fullständigt.

5.1.3 Grafisk presentation

Resultaten av resistivitetsmätningarna presenteras i form av årsmedian av tolkade djupsektioner för Wenner och pol-dipoldata. Dessa tolkade sektioner bygger i sin tur på 15-dagarsmedianer av mätdata. Vidare presenteras motsvarande sektioner med variationskoefficienten för de tolkade sektionerna. Resistiviteten i enstaka celler vid olika tidpunkter kan också redovisas.

SP-data ritas upp i diagram som visar variationen i SP-nivå längs varje mätlinje, baserat på veckomedianer. Ett par exempel på diagram med tidsvariation ges också.

5.2 Utvärdering av flöde

Utvärdering av flöde görs från de resistiviteter som erhållits för de olika beräkningscellerna vid den inversa modelleringen. Detta resultatet är behäftat både med mätfel och fel vid modelleringen. Det är därför viktigt att ha kunskap om ingående felen och dessas egenskaper så att felkällornas inverkan kan minimeras. Cellernas storlek (ca 20 - 50 m² i detta fall) är stora i förhållanden till de små lokala strömningsvariationer som kan förekomma i fyllningsdammar. Detta medför att resistiviteten i verkligheten kan variera inom beräkningscellen.

5.2.1 Fasförskjutning

Den enklaste formen för utvärdering är att beräkna fasförskjutningen för pulsens max- och min-värde. Detta görs automatiskt över hela mätsektionen genom att söka reda på tidpunkterna när den hösta respektive lägsta resistiviteten inträffar. För ett års mätresultat erhålls därför två olika värden för varje cell. I de fall fasförskjutningen är omkring ca ett år kan resultatet exempelvis bli 4 dagar för max-värdet och 363 dagar för min-värdet. Denna skillnad är inte rimlig varför den första pulsen bör justeras genom att addera ett år, dvs $365+4=369$ dagar. Den beräknade fasförskjutningen har därför justerats automatiskt genom att addera ett år om den beräknade understiger 100 dagar. Därefter har ett medelvärde beräknats.

Om vi antar att mätsektionen ligger i mätlinjen där elektrod kabeln ligger kan avståndet, x , till inströmningsranden beräknas med kännedom om dammens geometri. Med hjälp av fasförskjutningen, t_d , kan transporthastigheten beräknas som

$$v = \frac{x}{t_d} \quad \text{Ekv. (4)}$$

Om vi först antar att jonhalten i magasinet är konstant under året och att resistivitetsvariationerna enbart beror av temperaturvariationerna kan vi försumma den transport av joner som sker med porhastigheten. Den uppmätta resistivitetsvariationen i dammen beror därför endast av den transport som sker med den termiska hastigheten. Med hjälp av Ekv. (3) kan då det ur temperaturvariationen utvärderade flödet q_T skrivas som:

$$q_T = \frac{Cx}{C_w t_d} \quad \text{Ekv. (5)}$$

Denna ansats är en-dimensionell och beaktar ej värmeutbytet vinkelrät mot strömningsriktningen. Detta medför att den uppmätta transporttiden blir längre 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. (2) skrivas som:

$$q_n = \frac{nx}{t_d} \quad \text{Ekv. (6)}$$

Ekvationen beaktar ej dispersionens inverkan på transporten. Vid rådande förhållanden kan diffusionen försummas eftersom det är rimligt att anta att transporthastigheten är betydligt större. Den advektiva processen påverkar ej fasförskjutningen 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 är normalt ca 0,2 i tätkärnan och 0,3 i stödfyllningen, varför en medelporositet av 0,25 bedöms vara rimlig. Den volumetriska värmekapaciteten C är ungefär $2.0 \text{ MJ/m}^3/\text{K}$ för båda materialen vilket ger att C/C_w blir ca 0,5. De utvärderade flödena kan då skrivas:

$$\begin{aligned} q_T &= 0,5 \frac{x}{t_d} \\ q_n &= 0,25 \frac{x}{t_d} \end{aligned} \quad \text{Ekv. (7)}$$

I detta fall beror pulsen ungefär lika mycket av jon-innehåll och temperatur. Vid utvärderingen har därför valts ett medelvärde för att beräkna flödet q :

$$q \approx 0,35 \frac{x}{t_d} \quad \text{Ekv. (8)}$$

5.2.2 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. Dispersionen D beror av flödet men sambanden är osäkra. Några försök till utvärdering av amplituden enbart för joninnehållet har därför ej gjorts.

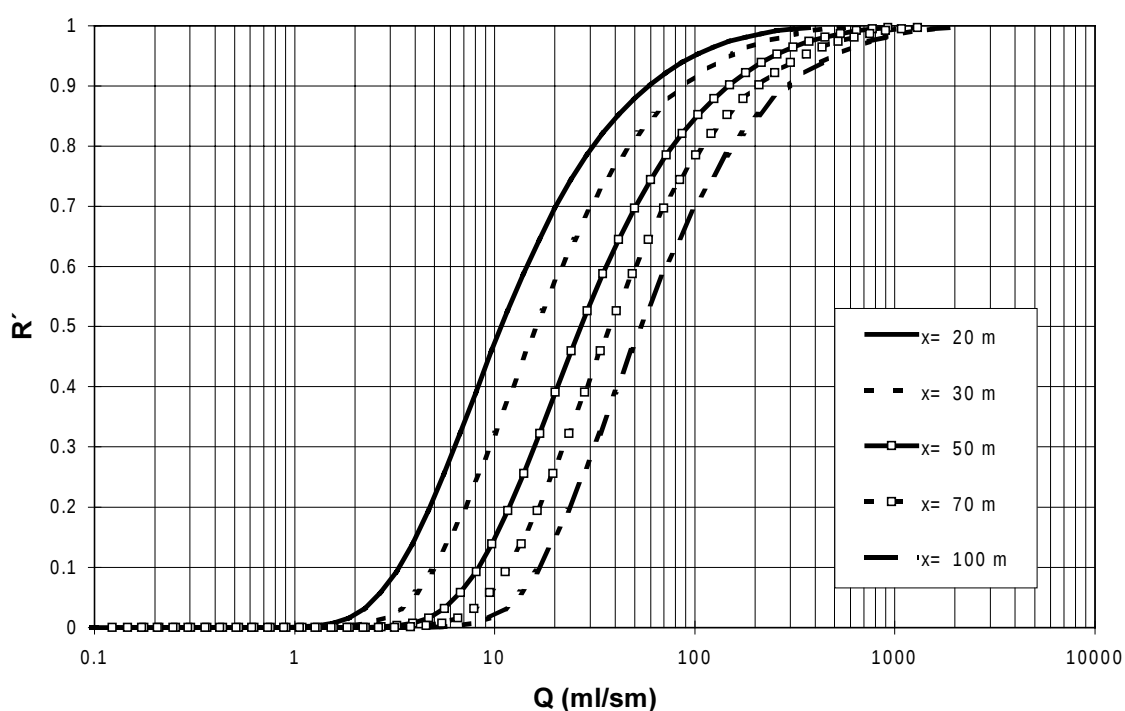
Utvärdering av amplituden kan emellertid göras om vi antar att de uppmätta resistivitetsvariationerna i dammen härrör från temperaturvariationerna i magasinet. Den dämpning som då erhålls beror främst av värmeledning vinkelrätt mot strömningsriktningen. Temperatur- och resistivitmätningar kan därför utvärderas på liknande sätt.

För utvärdering av temperaturmätningar har en modell tagits fram som anger en relation mellan uppmätt årlig temperaturvariation i dammen och vattenströmningen genom mät-punkten, Johansson (1997). Modellen är tvådimensionell och lösningen ges i dimensionslös form för bl a en dimensionslös temperatur T' . Modellen förutsätter att vattenströmningen sker genom en zon med en viss höjd. Metoden kan approximativt användas även om inte zonens höjd kan bestämmas exakt, vilket är lämpligt i detta fall där upplösningen i vertikalled bestäms av beräkningscellens höjd. Då erhålls inte flödet per m^2 utan istället erhålls flöde per m damm, Q (m^3/sm). Denna approximativa lösning, baserat på resistivitetens amplitud, kan användas i detta fall eftersom resistivitetsvariationen antas vara orsakad av temperaturvariationen.

Om vi antar att joninnehållet i magasinet är konstant, samt att jonutbytet mellan mineralkornen och det genomströmmade vattnet är försumbart, kan man visa att T' kan ersättas med den motsvarande dimensionslösa resistivitetsparameter som definierats tidi-

gare, nämligen den normerade resistiviteten, R' . Det innebär att vi har ett direkt samband mellan normerad resistivitet och flöde, se Figur 12. 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.

Det utvärderade flödet blir därmed representativt för den eller de celler som har störst variation i varje mätsektion. Eftersom cellernas höjd, H , är känd kan därefter flödet q beräknas ($q=Q/H$). Primärt måste en medelinströmningslängd från inströmningssektionen till mätsektionen bestämmas på samma sätt som för utvärdering av fasförskjutningen.



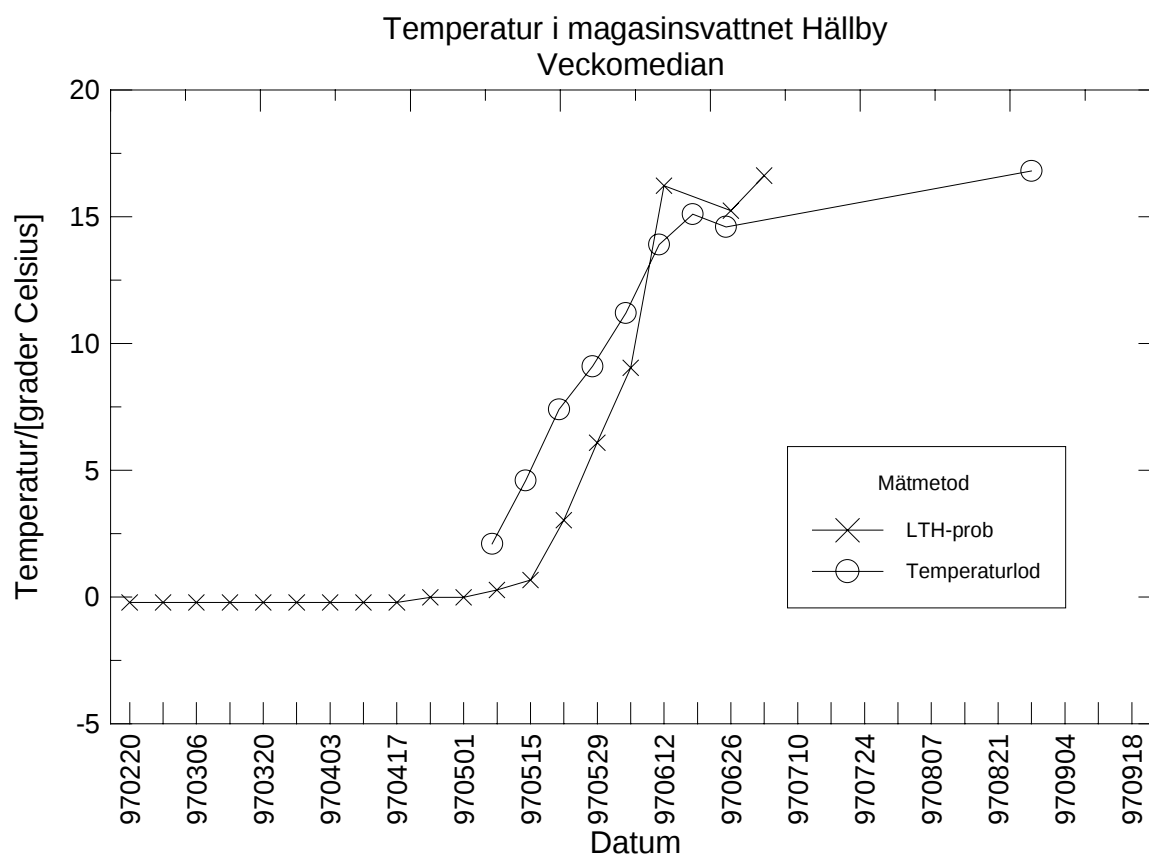
Figur 12 **Approximativt samband mellan R' (kvoten mellan årlig resistivitetsvariation i dammen och resistivitetsvariation i magasinet) och vattenströmning Q , vid antagen värmeledning 2,5 W/mK.**

6 Resultat - utvärderade resistiviteter och flöden

6.1 Magasinet

Mätningar av magasinsvattnets temperatur och resistivitet med hjälp av den specialutvecklade proben inleddes efter att den installerats i mitten av februari 1997 samt manuellt av personalen vid kraftverket.

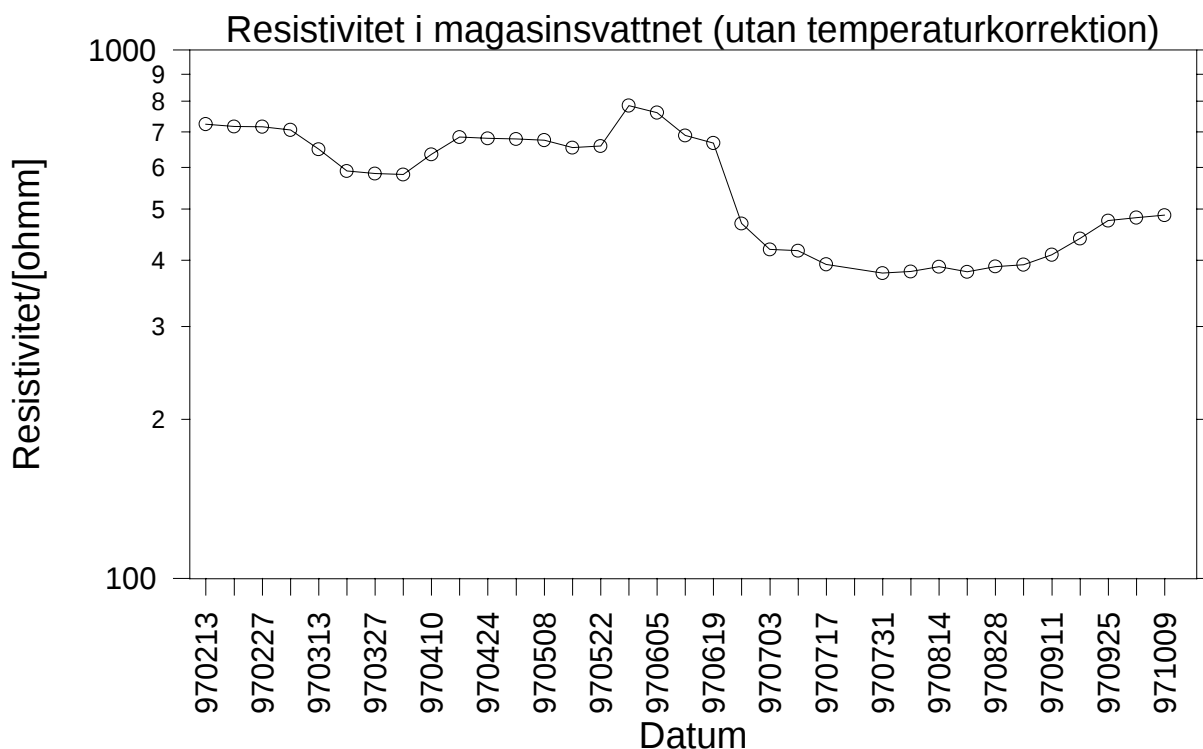
Temperaturen låg fram till mitten av maj omkring 0°C (Figur 13) för att sedan stiga till omkring 15°C på några veckor. Från mitten av juni är mätvärdena från temperaturproben instabila och blir från en bit in i juli helt orealistiska, det förefaller som om temperatursensorn skadats. De manuellt uppmätta temperaturdata från ett mättillfälle ligger några grader över veckomedianvärdena från mätsystemet. Avvikelsen mellan resultatet kan bero på flera orsaker: dels skillnader mellan en-dagsmätningar och veckomedianvärden, dels att de manuella mätningarna görs på uppströmssidan medan de automatiska görs på utgående vatten som är bättre omblandat. Vidare görs de automatiska mätningarna nattetid medan de manuella utförts dagtid.



Figur 13 Temperatur i magasinsvattnet, dels veckomedian av data från LTH-prob och dels manuellt uppmätta data.

Jämfört med tidigare mätningar vid Lövöns och Moforsens kraftverk (se Johansson och Dahlin 1995) är resistiviteten i Hällby inte lika tydligt sinusformad (Figur 14). Det är

därför svårare att med säkerhet fastställa tidpunkten då högsta respektive lägsta värdet inträffar. Vid utvärderingar nedan har antagits att den resistivitetsens högsta värde inträffar kring månadsskiftet maj/juni trots att den är ganska hög under hela vintern. Det lägsta värdet inträffar i mitten av augusti. Den relativa variationen under året $(R_{\max} - R_{\min})/R_{\text{med}}$ blir ca 0,7.

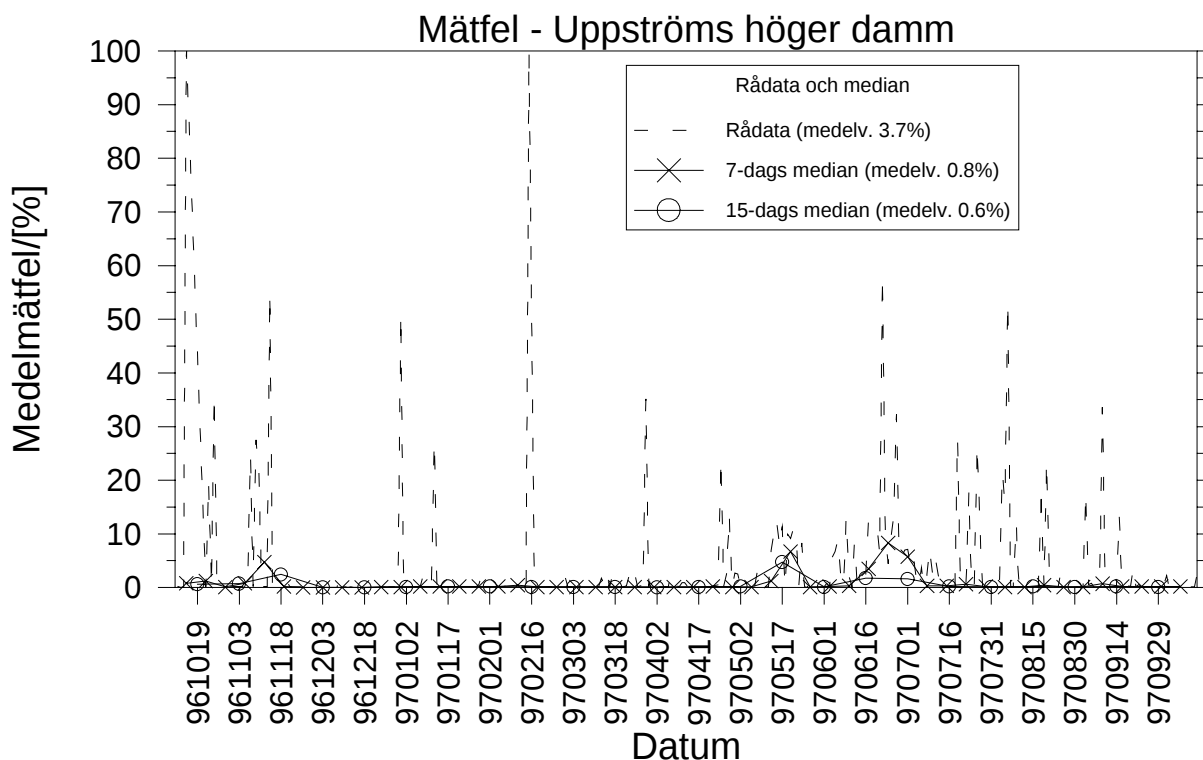


Figur 14 Veckomedian av resistivitet (ej temperaturkorrigerad) i magasinsvattnet.

6.2 Höger damm uppströms

6.2.1 Resistivitet

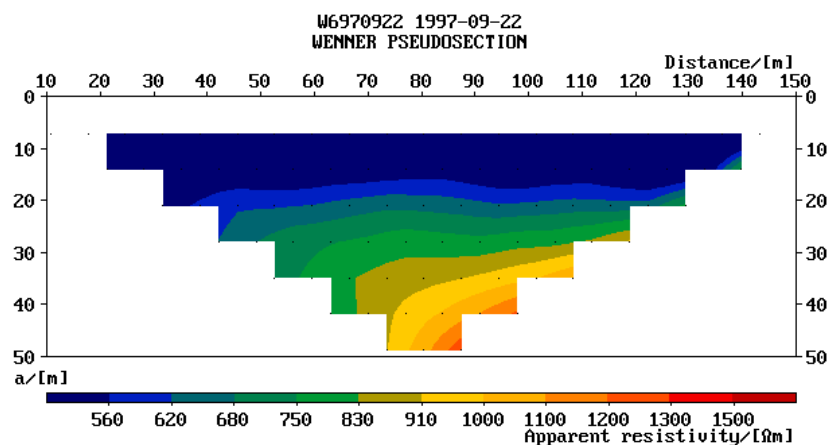
Mätkvaliteten på data från höger uppströmssida är generellt sett bra, med medelfel som normalt ligger väl under 1% enligt reciproka Wennermätningar, men med enstaka spikar i medelfelen. Figur 15 visar medelmåtfel i Wennerdata från uppströms höger damm, visade som dagliga medelvärden för rådata, 7-dagars median och 15-dagars median. Medianen avlägsnar här effektivt de kraftigaste spikarna i mätfelen, men efterlämnar några enstaka tillfällen med medelmåtfel över 1%. Det kan dock bero på någon enstaka datapunkt med större fel som ger kraftigt genomslag i medelvärdet. Medelmåtfelens storlek är ungefär lika både för 7 och 15-dagarsmedianen.



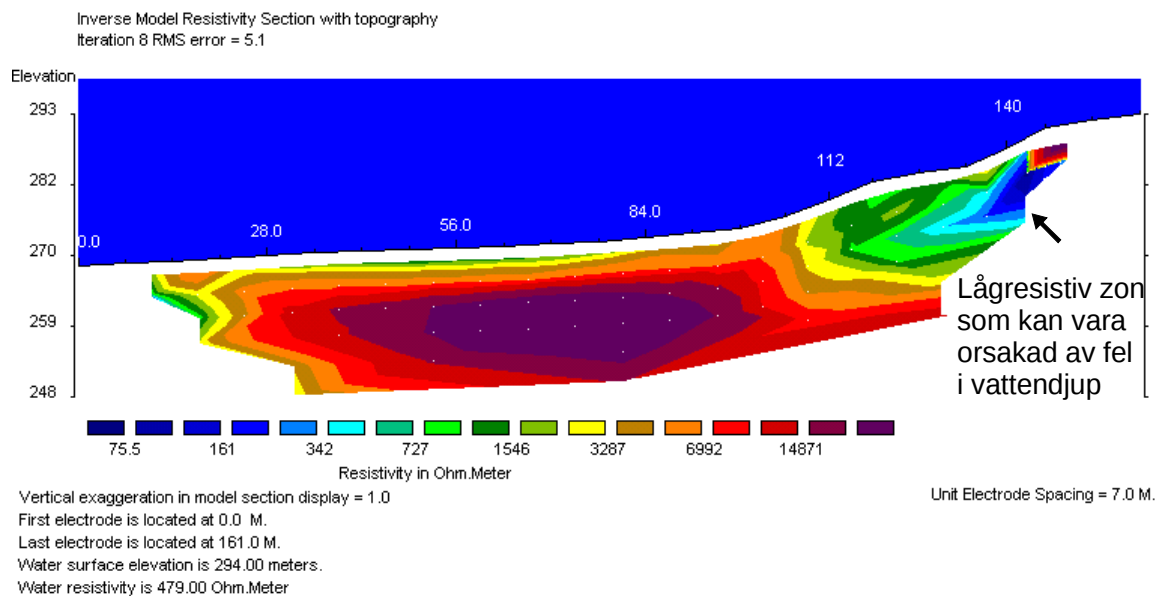
Figur 15 Medelmätfel i Wennerdata från uppströms höger damm, visade som dagliga medelvärden för rådata, 7-dagars och 15-dagars median.

Ett exempel på pseudosektion uppmätt med Wennerkonfiguration visas i Figur 16. Som framgår av sektionen ligger de skenbara resistiviteter för de kortare elektrodavstånden i samma storleksordning som resistiviteten i magasinet som de bör göra. Utseendet på pseudosektionen styrs i det här fallet i princip av variationen i vattendjup, så att man ser större effekter av magasinsbottens högre resistiviteter i den högra delen av sektionen där vattendjupet är mindre. Pseudosektionens utseende vittnar om god datakvalitet.

Test med tolkning av data uppmätta under vatten på denna linje har gjorts (Figur 17). Resistiviteten i vattnet har valts med ledning av Figur 14. Vattendjupen är uppskattade från konstruktionsritningarna, och är säkert behäftade med ganska stora fel. Även måttliga fel i vattendjupet torde ha stor betydelse för resultatet i denna tolkning, eftersom vattnets konduktivitet förmodligen är klart högre än för underliggande jord/berg. Den lågresistiva zonen till höger i sektionen är troligen en sådan effekt. För att göra en ordentlig tolkning av undervattenssektionerna krävs inmätning av undervattenselektrodena.



Figur 16 Exempel på pseudosektion från höger damm uppströms.



Figur 17 Resultat av modelltolkning av undervattensdata från uppströms höger damm.

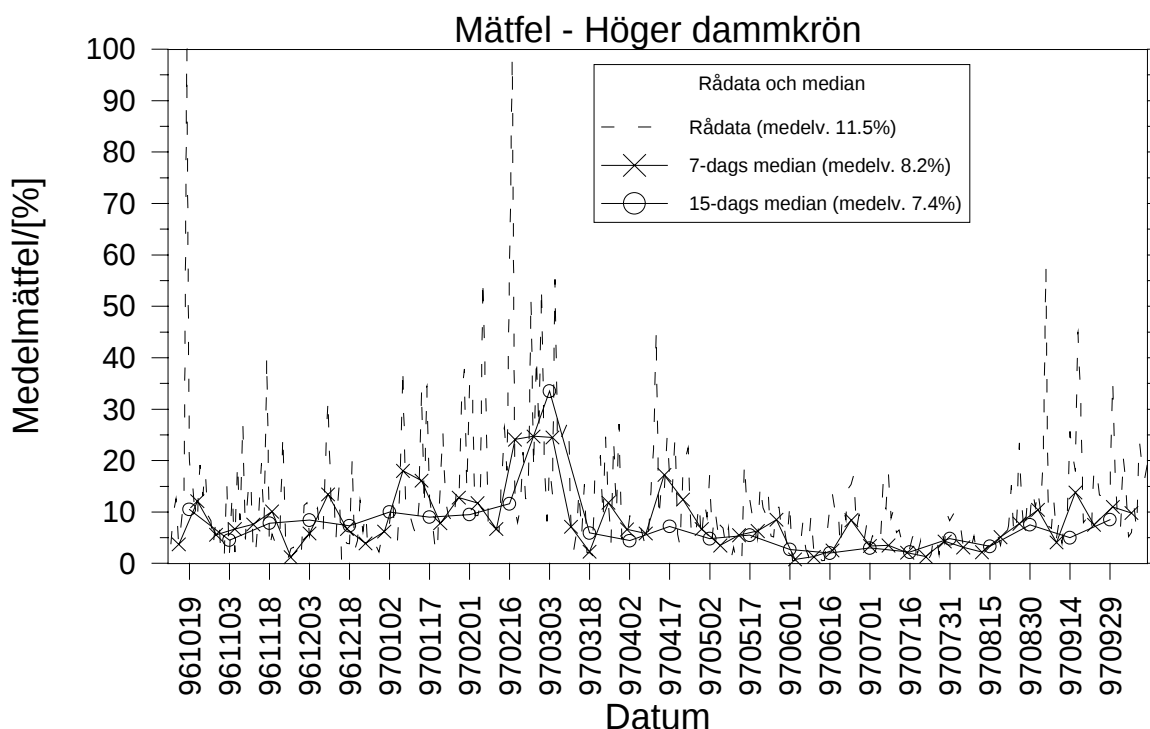
6.2.2 Diskussion

Den goda datakvaliteten gör att resultaten ser lovande ut även om det inte kan göras en fullständig utvärdering för ögonblicket. Utvärderingen är känslig för elektrodernas höjdläge då detta inverkar på vattendjupet, inmätning av elektrodpositionerna är därför nödvändigt för en fullständig utvärdering av data. Det är därför inte meningsfullt att göra någon uppskattning av flödet i sektionen.

6.3 Höger dammkrön

6.3.1 Resistivitet

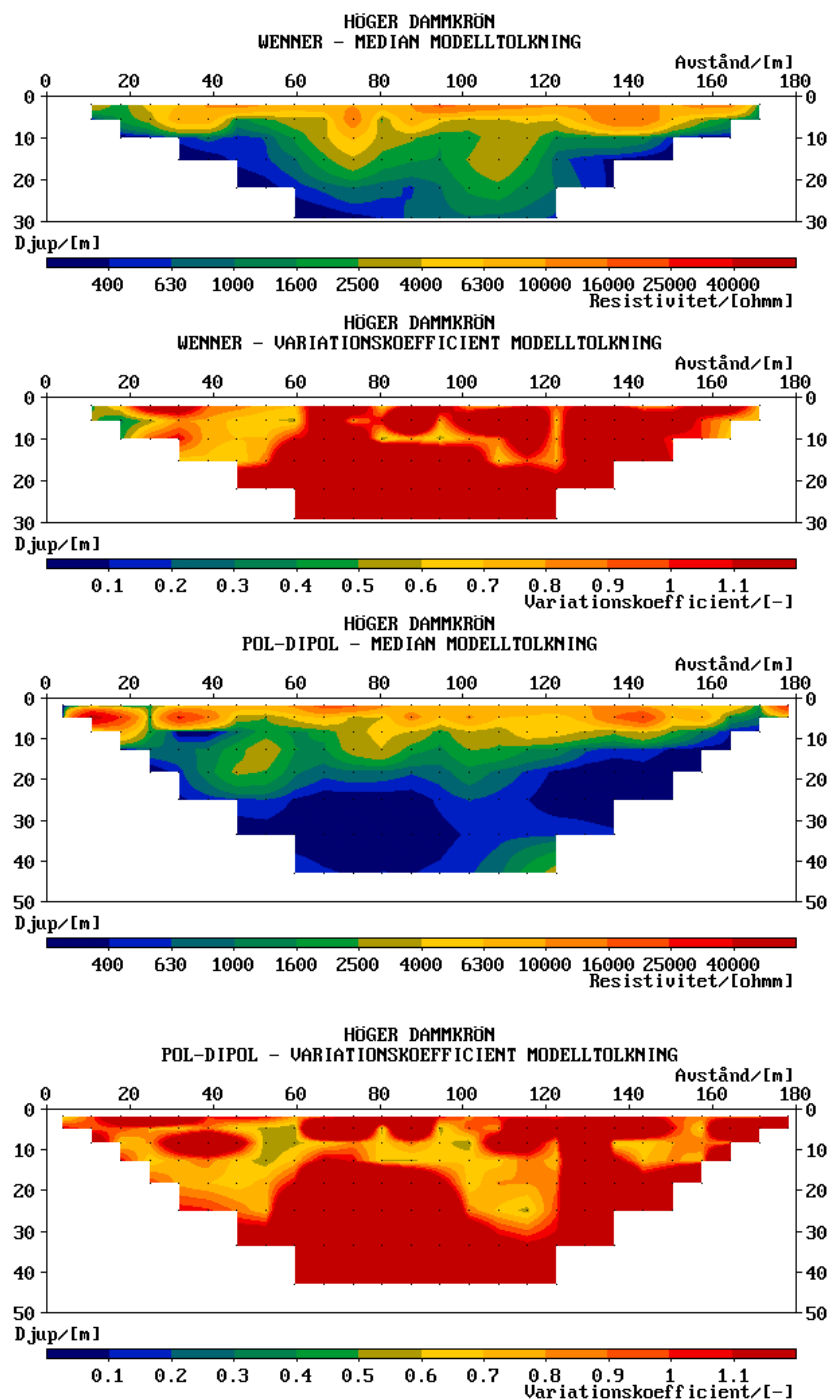
Mätkvaliteten i data från höger dammkrön är otillfredsställande, mätfelel ligger i medeltal över 10% (Figur 18). Tidbasfiltrering med hjälp av veckomedian tar visserligen bort de kraftigaste topparna, men medelfelet ligger även hos filtrerade data kring 8% både för 7- och 15 dagars-medianen.



Figur 18 Medelmätfel i Wennerdata från höger dammkrön, visade som dagliga medelvärden för rådata, 7-dagars och 15-dagars median

Tolkade resistiviteter visas i form av medianvärde och variationskoefficient för Wenner och pol-dipol i Figur 19. Sektionen betraktas från uppströmssidan, och koordinaten 0 meter motsvarar första elektrodpositionen som ligger intill betongkonstruktionen vid utskovet. Resistiviteter varierar mycket kraftigt inom mediansektionen (Figur 19a och c), från under 400 Ωm till över 10000 Ωm , där de högsta resistiviteter återfinnes närmast markytan och de lägsta längst ned, under den nivå som motsvarar bergets överyta. Detta skulle kunna tolkas som att resistiviteten i berget är lägre än i dammens tätkärna. Resultaten överensstämmer relativt väl mellan metoderna.

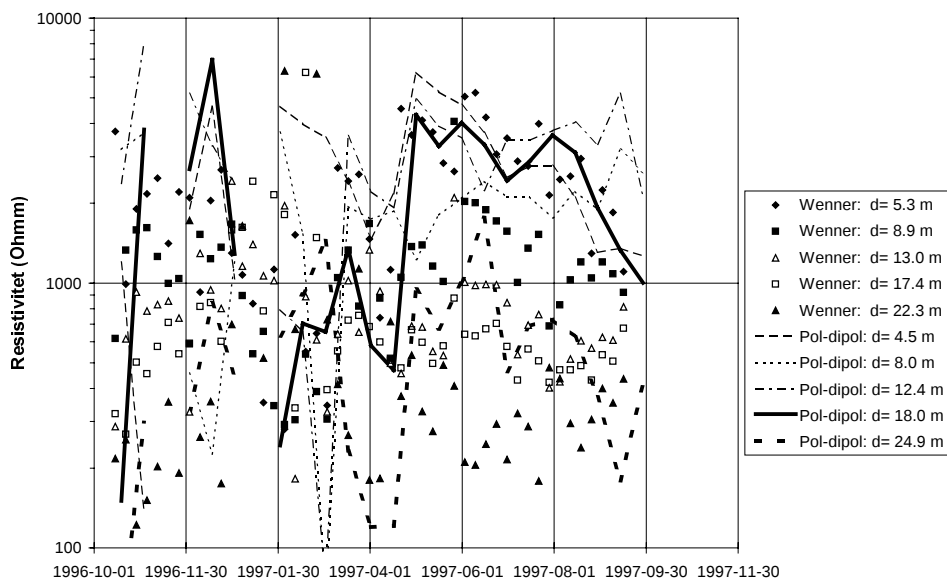
Resistiviteter varierar kraftigt i tiden, men det framgår tydligt av variationskoefficienten att veckomedianfiltreringen (Figur 19b och d) inte lyckats bemästra mätstörningarna. En närmare granskning av data visar att det är maximumvärdena som är kraftigt störda, medan minimumvärdena förefaller mindre störda att döma av utseendet på sektionerna (ej visat i figur).



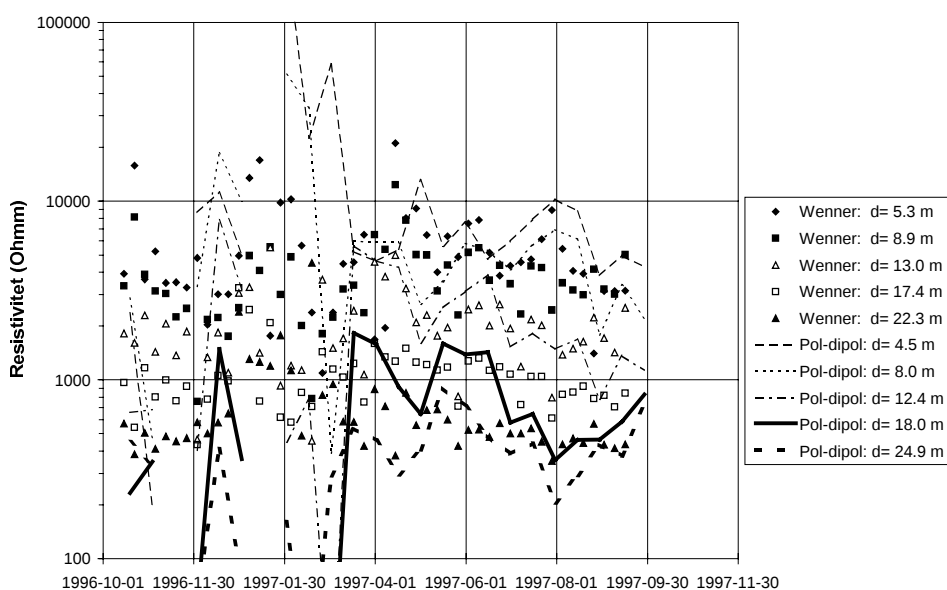
Figur 19 Resultat av modelltolkning för Wennerkonfiguration på höger dammkron, i form av statistiska bearbetningar av tolkade 15-dagsmedianer för det första mätåret. Punkterna markerar mitten i de tolkade cellerna. Sektionerna visar: a) årsmedian Wenner, b) variationskoefficient Wenner, c) årsmedian pol-dipol, d) variationskoefficient pol-dipol.

Resistiviteten visar mycket stora variationer under mätperioden vilket med all säkerhet beror på de stora mätfelen, speciellt under perioden december - mars. Resultatet blir mer stabilt efter april 1997. Skillnaderna mellan de olika mätmetoderna blir då också mindre vilket framgår av Figur 20 och Figur 21. Det är dock klart att resultatet ej är tillräckligt

säkert för att utgöra underlag för att bestämma högsta och lägsta värden under mätperioden i sektioner liknande den som visas i Figur 20. För andra sektioner, exempelvis 0/115.5 som visas i Figur 21, är säsongvariationen tydligare med det högsta värdet i början av april och det lägsta värdet under hösten 1997.



Figur 20 Utvärderade resistivitet i sektion 0/052.5 på dammkrönet.



Figur 21 Utvärderade resistivitet i sektion 0/115.5 på dammkrönet.

6.3.2 Vattenströmning

På grund av osäkerheterna i de utvärderade resistiviteterna redovisas ej någon automatisk utvärdering av flödet över hela mätsektionen. Någon utvärdering med amplitudmetoden har ej kunnat göras på grund av de stora mät- och utvärderingsfelen.

För de celler som visats ovan i sektionerna 0/052.5 och 0/112.5 blir fasförskjutningen cirka ett år, vilket motsvarar en vattenströmning mellan 0,1 och 0,5 ml/sm². Det utvärderade flödet är lågt och anger att den hydrauliska konduktiviteten K skulle vara ca 10⁻⁷ m/s eller lägre, under förutsättning att mätningarna är tillförlitliga.

6.3.3 *Diskussion*

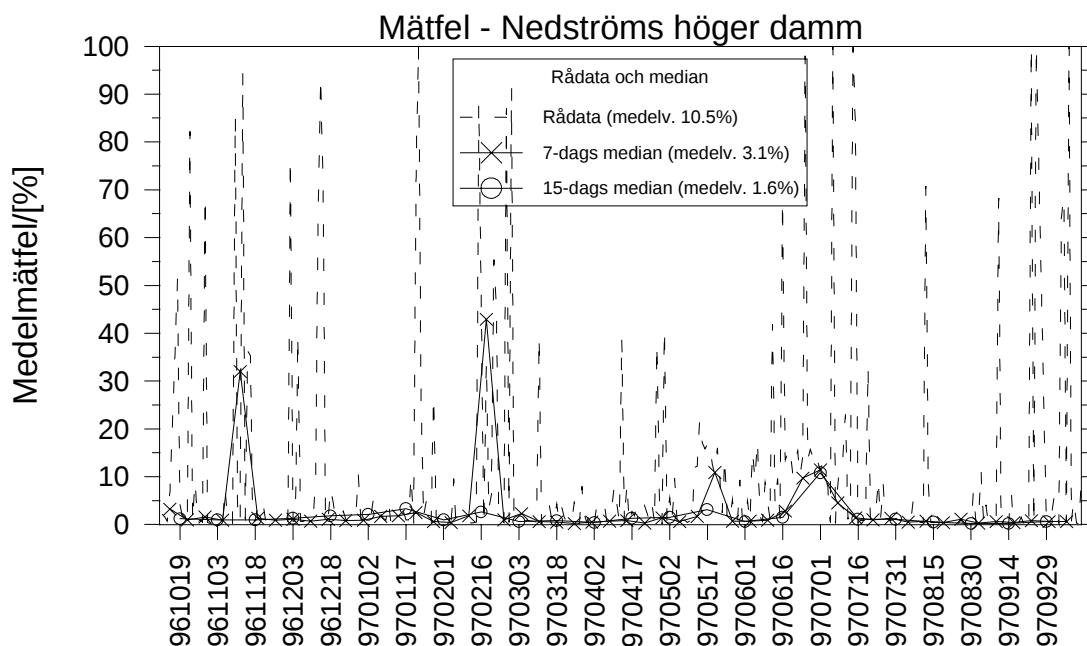
Mätresultatet utmed denna mätlinje visar stora variationer och mätkvaliteten är ej tillfredsställande, och medger ej någon automatisk utvärdering av vattenströmningen. Det största problemet är förmodligen elektrodkontakten som måste förbättras för att bättra på mätkvaliteten. Det är troligen nödvändigt att få ned elektroderna på större djup för att etablera bättre kontakt, vilket uppenbarligen svårligen kan göras med hjälp av grävning med tanke på dammsäkerhet och kostnader. Man kan dock tänka sig att det är möjligt att utveckla en metod för att installera elektrodspetsar på upp till några meters djup med hjälp av en geoteknisk sonderingsutrustning.

6.4 Höger damm nedströms

6.4.1 *Resistivitet*

Elektroderna på nedströmssidan är belägna på ca +274 vid utskovet (sektion 0 i diagrammen nedan) men stiger långsamt till ca + 280 vid dammens anslutning mot befintlig mark. Detta kan jämföras med bergets nivå som är mellan +268 och +270. Några vattenståndsrör finns ej varför grundvattenytan i nedströms dränlager ej är känd. Förmodligen är dess nivå någon eller några meter ovanför berget.

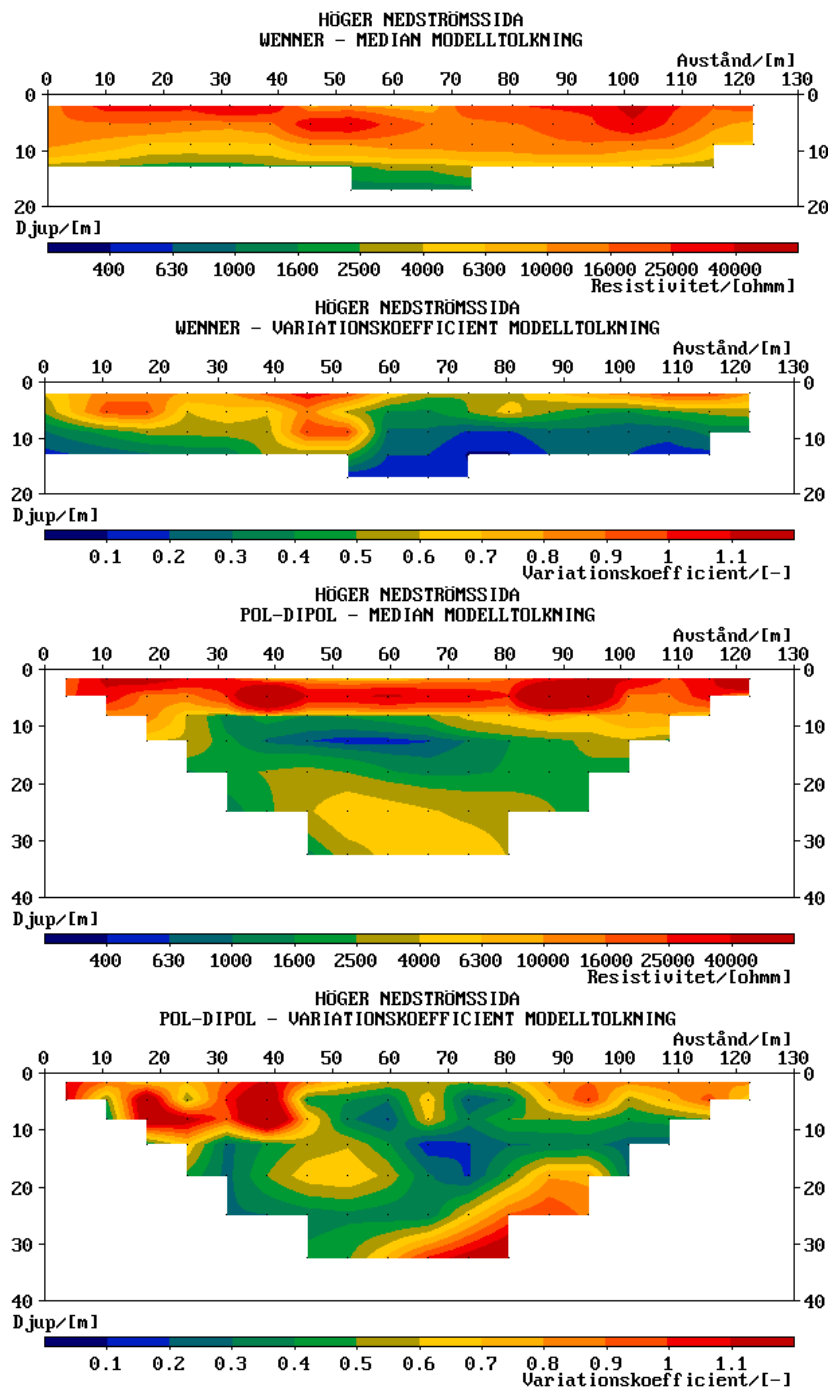
Mätkvaliteten på höger nedströmssida varierar kraftigt, med relativt vanligt förekommande kraftiga medelmätfel som lyfter upp medel av medelfelen till 10% (Figur 22). Till skillnad mot höger dammkrön är dock mätfelen i de flesta fallen lägre, vilket medför att medianfiltreringen kan nedbringa medel av medelfelen till omkring 3% respektive 1,6%. För veckomedian ligger medelmätfelen större delen av året på ett par procent, men vid några tillfällen under året Filtrering med 15-dagars median får ned medelmätfelen till ett par procents nivå utom vid ett tillfälle, omkring 1 juli 1997. Eftersom det rör sig om medelvärden kan det dock vara så att en eller några få helt orimliga datapunkter drar upp medelvärdet kraftigt.



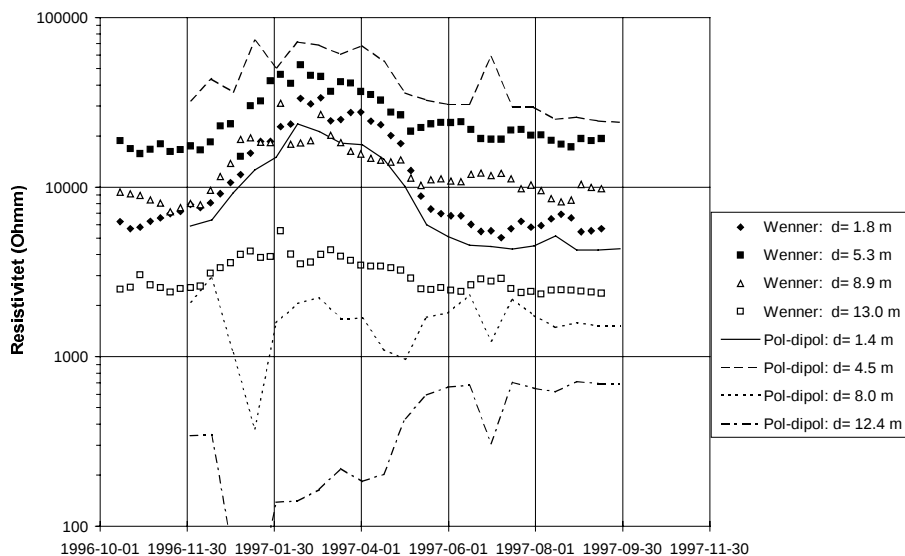
Figur 22 Medelmätfel i Wennerdata från mätsektionen nedströms höger damm, visade som dagliga medelvärden för rådata, 7-dagars och 15-dagars median.

Tolkade resistiviteter visas i Figur 23 i form av medianvärde och variationskoefficient. Sektionen betraktas från uppströmssidan, och koordinaten 0 meter motsvarar första elektrodpositionen som ligger intill betongkonstruktionen vid utskovsrännan. Resistiviteter ligger i huvudsak högt inom mediansektionen (Figur 23a och c), med en variation från under 1000 Ωm till över 10000 Ωm , där de högsta resistiviteterna återfinns närmast markytan och de lägsta på omkring 15 metres djup (pol-dipolsektionen), vilket är ca 10 m under bergets överyta. Resultaten stämmer ganska väl överens mellan metoderna, om man beaktar att lagerindelningen i de tolkade modellerna skiljer sig åt med därtill kopplade ekvivalenseffekter. Resistiviteter varierar kraftigt i tiden, med en variation på över 90% (Wenner) respektive över 100% (pol-dipol) i ett parti nära markytan (Figur 23b och d).

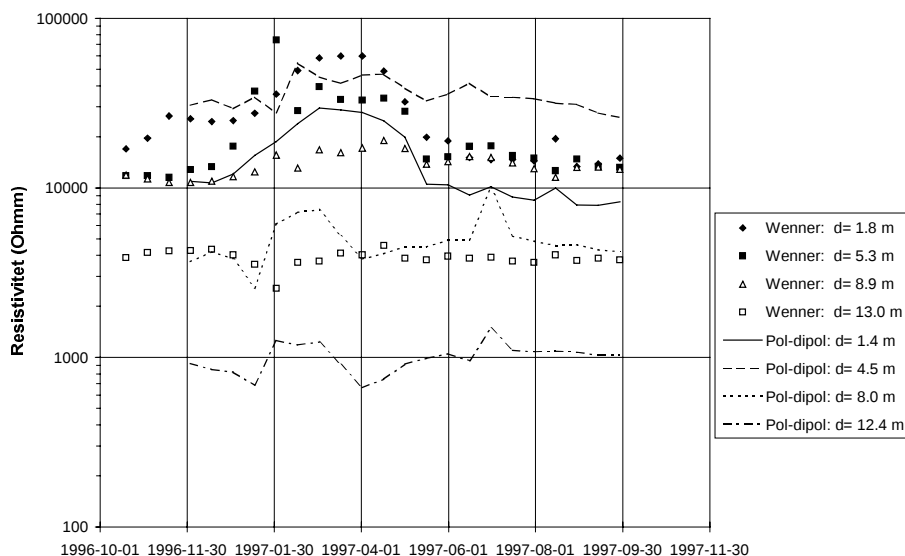
Mätsektionen är belägen på nivå ca +274 m vilket är ca 6 m ovanför bergets överyta. Några vattenståndsmätningar finns ej, men grundvattennivån bör var högst några meter ovanför bergnivån eftersom nedströmsvattenytan är ca +270 m. De variationer som finns i de översta cellerna torde därför ej orsakats av vattenströmning. Wennermätningarna visar en markant skillnad i resistivitet i de tre översta cellerna jämfört med den understa, jfr Figur 24 och Figur 25. Överensstämmelsen i de två översta cellerna mellan Wenner- och pol-dipol-mätningarna är god, vilket dessvärre ej kan sägas för de understa cellerna där resultatet från pol-dipolmätningarna är svårförklarligt. En säsongsvariation kan skönjas för alla Wennermätningarna med ett maximum kring jan/feb och minimum kring aug/sept. Detta ger en fasförskjutning av ca 10-12 månader.



Figur 23 Resultat av modelltolkning för Wennerkonfiguration nedströms höger dammkrön, i form av statistiska bearbetningar av tolkade 15-dagsmedianer för det första mätåret. Punkterna markerar mitten i de tolkade cellerna. Sektionerna visar: a) årsmedian Wenner, b) variationskoefficient Wenner, c) årsmedian pol-dipol, d) variationskoefficient pol-dipol.



Figur 24 Utvärderade resistiviteter i sektion 0/053.



Figur 25 Utvärderade resistiviteter i sektion 0/074.

Utformning av dammens nedströmsdel medför att den huvudsakliga vattenströmningen bör ske i dräneringslagret ovanför bergets nivå, vilket ungefär motsvarar cellen med medeldjup $d=5.3$ m. Med undantag av sektion 0/053 är variationen är likartad över hela mätsektionen även resistiviteten varierar utmed dammens längd, jfr Figur 26.

Fel! Ogiltig länk.

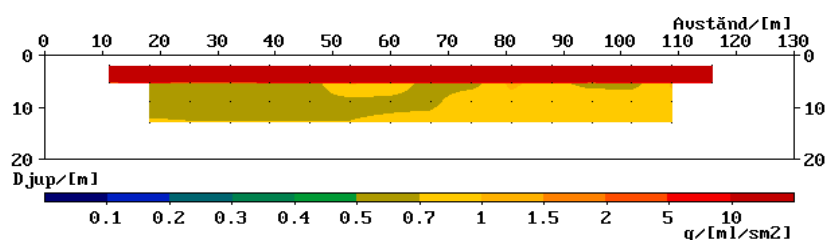
Figur 26 Utvärderade resistiviteter på medeldjupet 12.97 m längs hela mätlinjen höger damm nedströms.

Det kan också noteras att mätresultaten är förvånansvärt lika vid mätningarnas början och slut. Detta tyder på att resistiviteten har en säsongsvariation som kan registreras och att variationen är större än de mät- och utvärderingsfel som föreligger. Även i detta

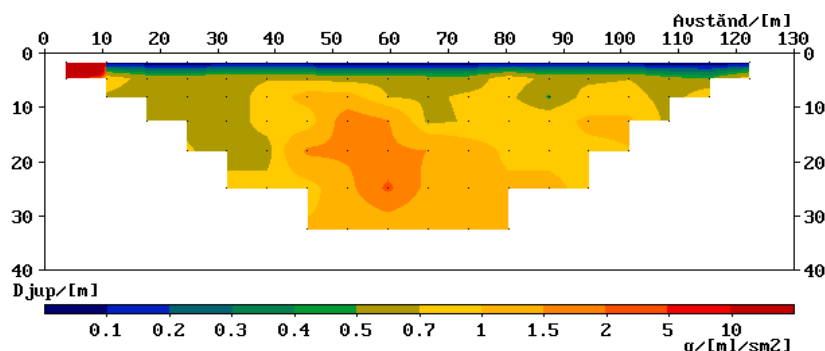
avseende är sektion 0/053 ett undantag: resistiviteten är ungefär dubbelt så hög i oktober 1997 jämfört med 1996. Orsaken till detta är för närvarande oklar.

6.4.2 *Vattenströmning*

I hela mätsektionen visar mätresultaten en tydlig säsongsvariation med de lägsta resistiviteter under oktober till december (se Figur 26). De högsta värdena har uppmätts mellan februari och april. Detta innebär ca ett års fasförskjutning av variationen i magasinet. Några koncentrerade läckagevägar har ej observerats. Eftersom mätningarna ger ett stabilt intryck har en automatisk utvärdering gjorts över hela mätsektionen, se Figur 27. Vattenströmning som erhålls ur fasförskjutningen ger värden mellan 0,3 och 0,7 ml/sm på medeldjupet 5.3 m. De högre värden som erhålls i berget, speciellt enligt pol-dipolmätningarna (se Figur 28), är tveksamt med tanke på den lilla variationen under mätperioden i förhållande till mätosäkerheten.



Figur 27 Beräknat flöde ur fasförskjutningen erhållen från Wenner-mätningarna. Beräkningarna har gjorts över hela tvärsnittet även om vattenströmning endast sker under ca 4 m djup.



Figur 28 Beräknat flöde ur fasförskjutningen erhållen från pol-dipolmätningarna. Beräkningarna har gjorts över hela tvärsnittet även om vattenströmning endast sker under ca 4 m djup.

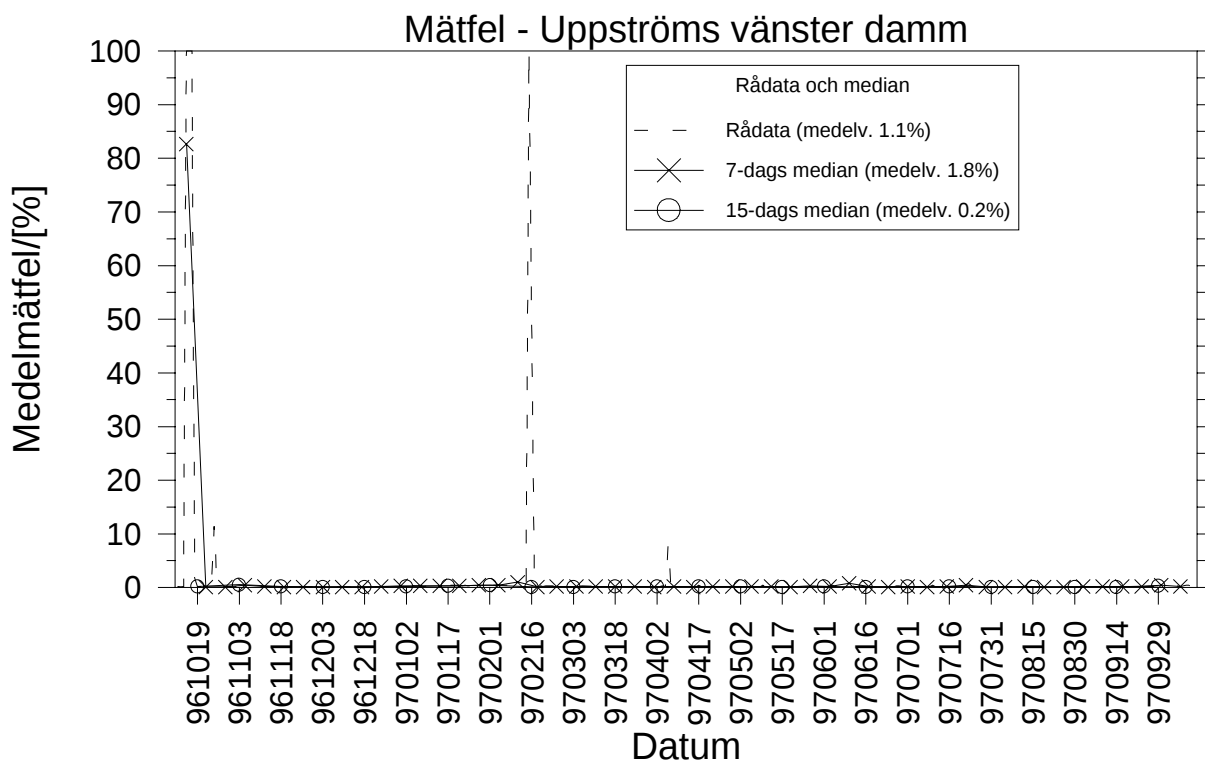
6.4.3 Diskussion

Mätnoggrannheten i denna mätsektion möjliggör automatiserad bearbetning och framtagning av max-, min- median värden. Den bör dock modifieras så att resultat med stora mätfel tas bort redan innan bearbetningen. Likaså bör endast de celler som berörs av vattenströmning redovisas. Markytan i mätsektionen bör också läggas in i diagrammen om den ej är horisontell. De beräknade flödena synes vara rimliga i sektionens övre del ovanför berget. Det är för tillfället omöjligt att fastställa om flödet i berget är större eller om transporttiden är ett år längre än den som erhållits. Flödet skulle i så fall mindre än hälften av det flöde som visas i figurerna ovan.

6.5 Vänster damm uppströms

6.5.1 Resistivitet

Mätkvaliteten för vänster uppströmssida är mycket god, med mätfel som för Wenner-konfigurationen normalt ligger väl under 1% (Figur 29). Medianfiltreringen avlägsnar de störningar som förekommer förutom vid ett tillfälle i början av mätserien. Medelvärdena av medelfelen dras upp till knappt 2% av enstaka kraftigt störda tillfällen, men ligger i allmänhet kring 0.2%.



Figur 29 Medelmätfel i Wennerdata från uppströms vänster damm, visade som dagliga medelvärden för rådata, 7-dagars och 15-dagars median.

Modelltolkning av resistiviteten är ännu ej utförd, kvalificerad utvärdering kräver inmätning av elektrodpositioner.

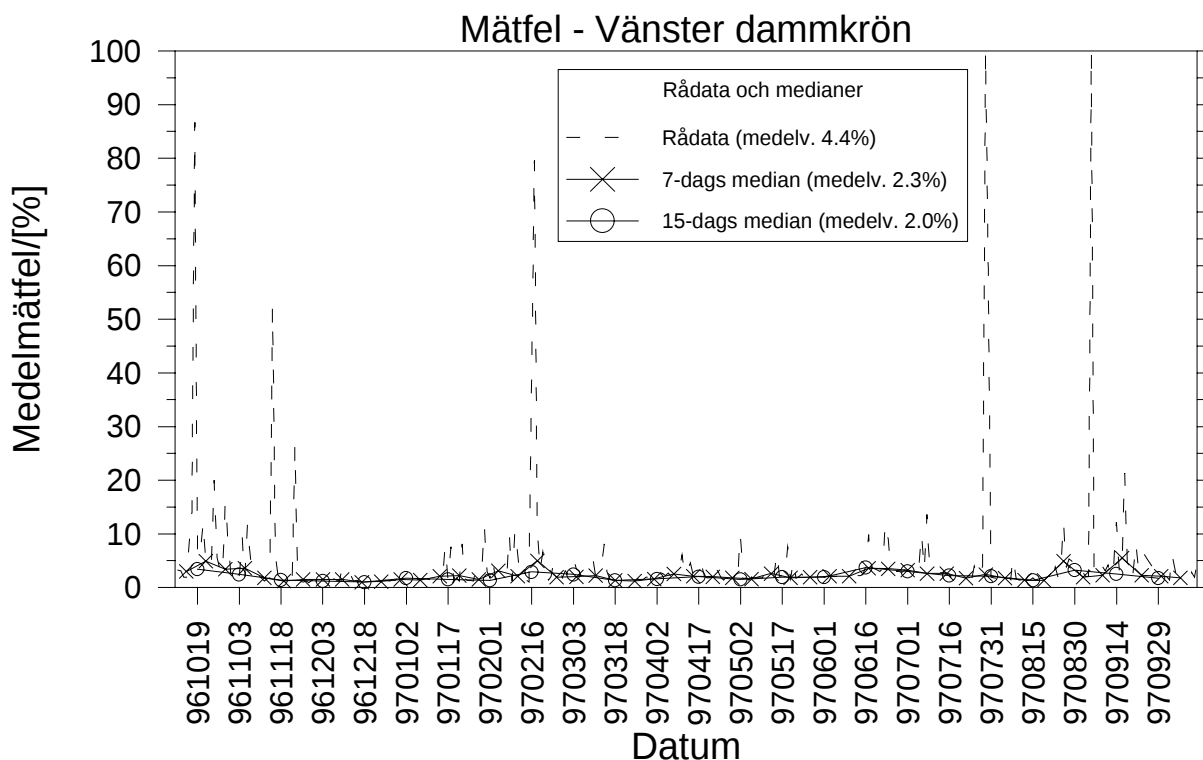
6.5.2 Diskussion

Den goda datakvaliteten gör att resultaten ser lovande ut även om det inte kan göras en fullständig utvärdering för ögonblicket. Någon utvärdering av flöden har ännu ej gjorts och får vänta i avvaktan på modelltolkning av resistiviteten.

6.6 Vänster dammkrön

6.6.1 Resistivitet

Mätkvaliteten på vänster dammkrön är relativt tillfredsställande (Figur 30). Det förekommer visserligen flera tillfällen med kraftigt störda mätvärden, men tidbasfiltreringen förmår undertrycka dessa ganska väl vilket resulterar i ett medel av medelfelen kring 2%. Skillnaden mellan 7- och 15-dagarsmedianen är dock ganska liten, vid några få tillfällen hamnar medelmätfelen omkring 5% för veckomedianen vilket ej är fallet med 15-dagars filtreringsbas.

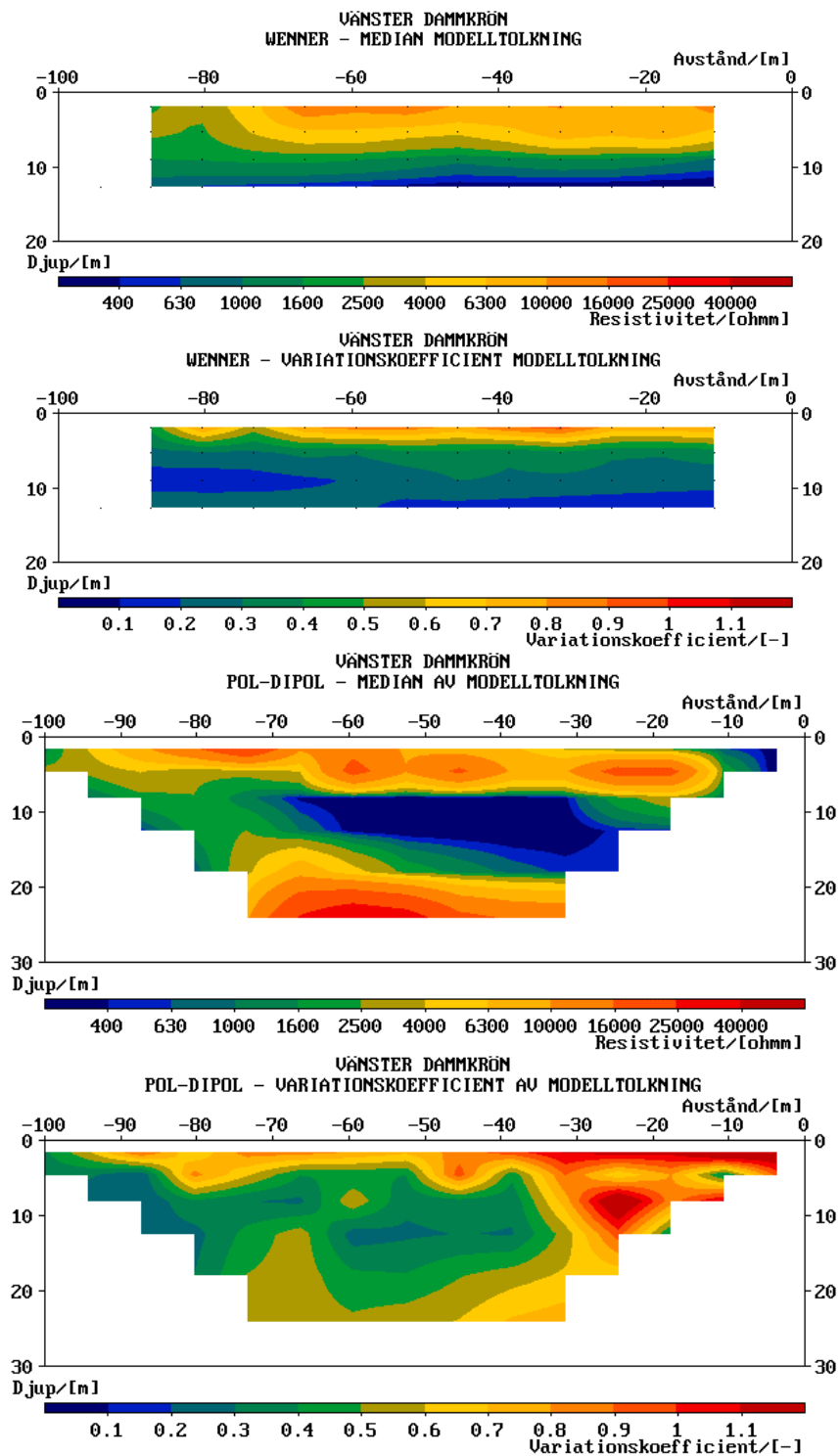


Figur 30 Medelmätfel i Wennerdata från vänster dammkrön, visade som dagliga medelvärden för rådata, 7-dagars och 15-dagars median.

Tolkade resistiviteter visas i Figur 31 i form av medianvärde och variationskoefficient. Sektionen betraktas från uppströmssidan, och koordinaten 0 meter motsvarar första elektrodpositionen som ligger intill betongkonstruktionen vid kraftverket. Resistiviteter varierar mycket kraftigt inom mediansektionen (Figur 31a och c), från under 400 Ωm till över 10000 Ωm , där de högsta resistiviteter återfinnes närmast markytan och de lägsta på djup omkring 10-15 meter. Medianvärdena för Wenner- och pol-dipolsektionerna överensstämmer ganska väl med undantag av mätsektionens högra del. Generellt tycks överensstämmelsen både beträffande medianvärde och variation, vara något sämre i mätsektionens ytterområden. Detta kan bero på att mätkonfigurationerna har olika känslighet i olika områden.

Resistiviteter varierar kraftigt i tiden, med en variation på över 80% (Wenner) respektive över 100% (pol-dipol) i en del partier närmast markytan (Figur 31b och d).

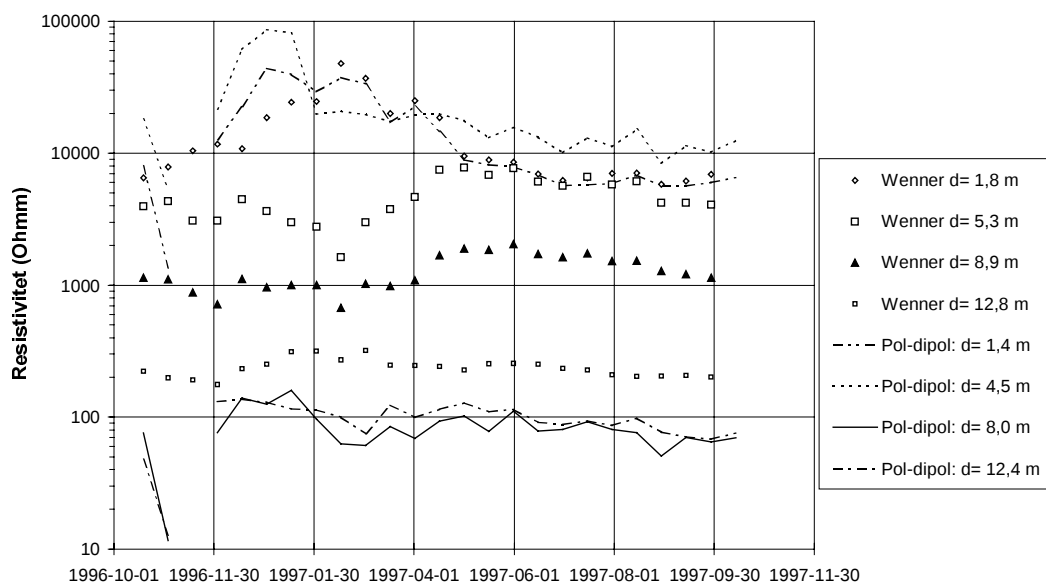
På cirka 15 m djup mellan sektion 0-040 och 0-080 finns en lågresistiv zon. Den cirka 5-10 m höga zonen är anmärkningsvärd och framgår av resultatet från båda mätkonfigurationerna. Injektering har skett vid dammens anslutning mot intaget, dvs utanför mätområdet. Orsaken till den låga resistiviteten kan ej avgöras för närvarande men skulle kunna vara högre finjordshalt, förhöjd vattenhalt, jordlina/kablage, metallföremål etc.



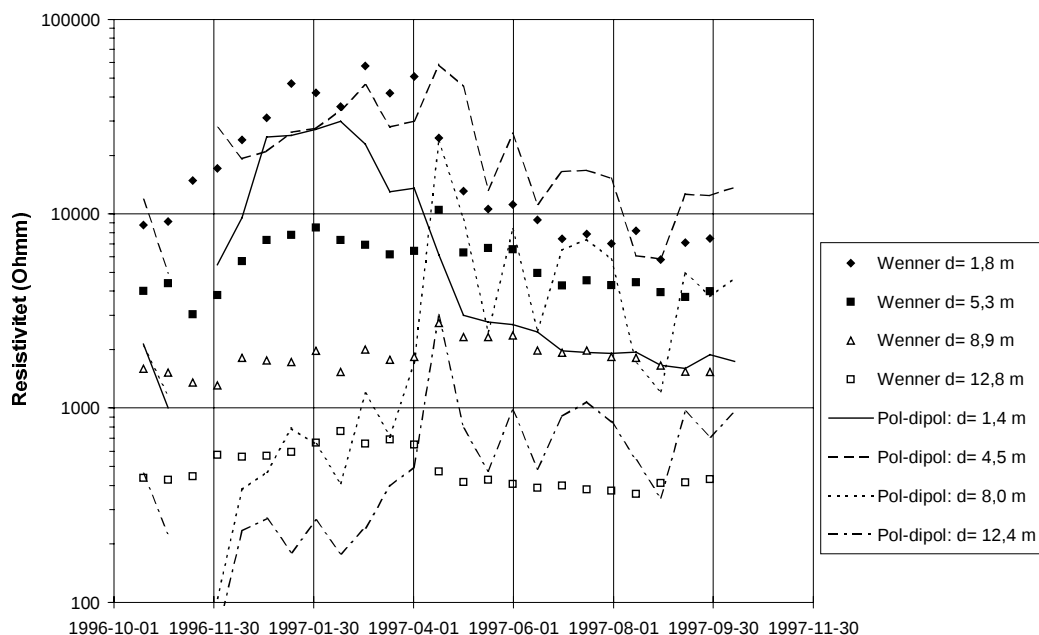
Figur 31

Resultat av modelltolkning för vänster dammkrön, i form av statistiska bearbetningar av tolkade 15-dagsmedianer för det första mätåret. Punkterna markerar mitten i de tolkade cellerna. Sektionerna visar: a) årsmedian Wenner, b) variationskoefficient Wenner, c) årsmedian pol-dipol, d) variationskoefficient pol-dipol.

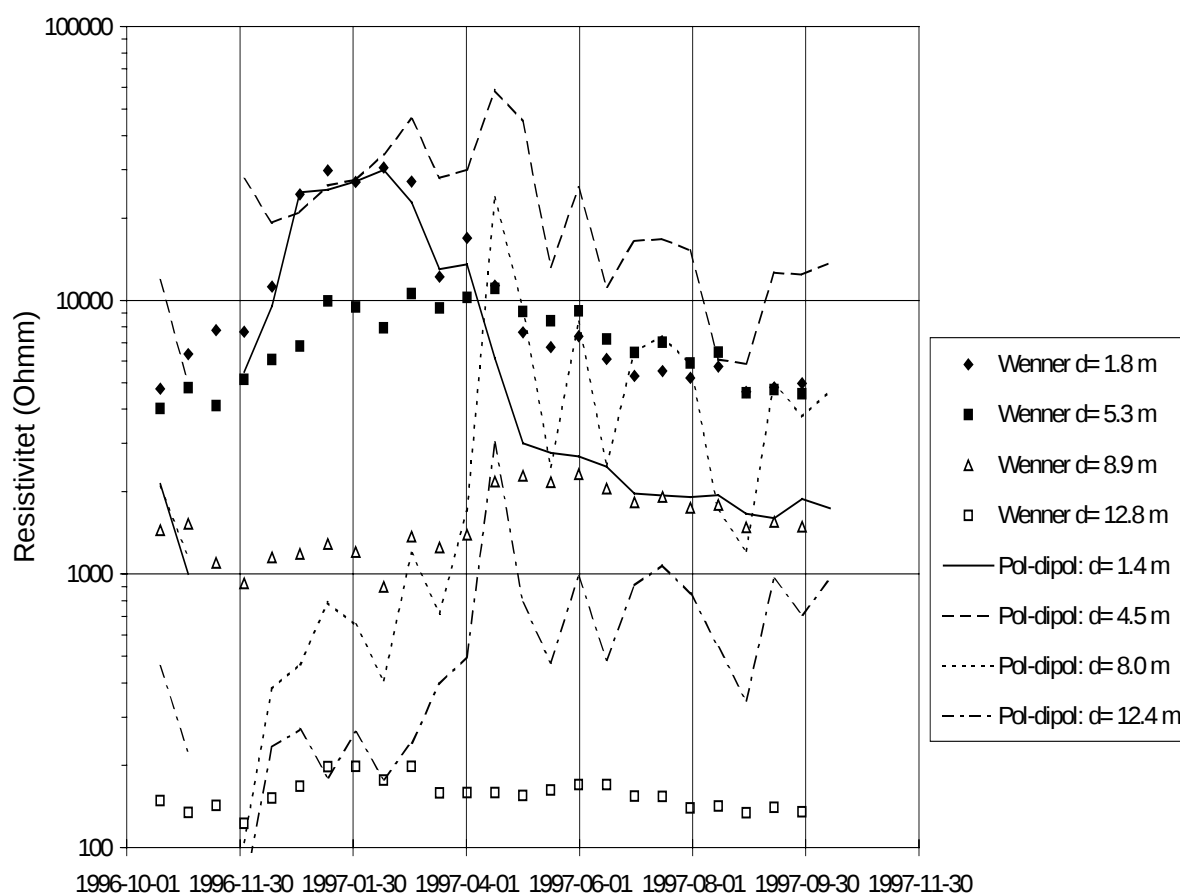
Wennermätningarna synes också här vara mer stabila än pol-dipolmätningarna, jfr Figur 32-34). Dessvärre är överensstämmelsen generellt dålig mellan modellerna både beträffande absolutvärden och variation. Den bästa överensstämmelsen fås i modellens översta och djupaste delar.



Figur 32 Resistivitet på olika djup i sektion 0-045,5.



Figur 33 Resistivitet på olika djup i sektion 0-017,5.



Figur 34 Resistivitet på olika djup i sektion 0-080,5.

6.6.2 Vattenströmning

Även för denna sektion är mätvariationerna för stora för att en automatisk bearbetning av max och min-värden är motiverad. Min-värdet synes vara mest tillförlitligt och inträffar med i medeltal ca 120 dygns färförskjutning. Detta ger ett flöde av ca 0,5 ml/sm i medeltal för alla mätpunkterna. Det högsta flödet är cirka 2 ml/sm. Någon entydig skillnad mellan det lågresistiva partiet och den övriga dammen kan ej urskiljas.

6.6.3 Diskussion

Det är en betydande skillnad i resultaten mellan Wenner och pol-dipol beträffande variationskoefficienten. Detta räcker dock att medianfiltreringen för pol-dipolresultaten inte varit tillfyllest för något enskilda tillfälle för att ge denna effekt.

7 Mätningar av självpotential

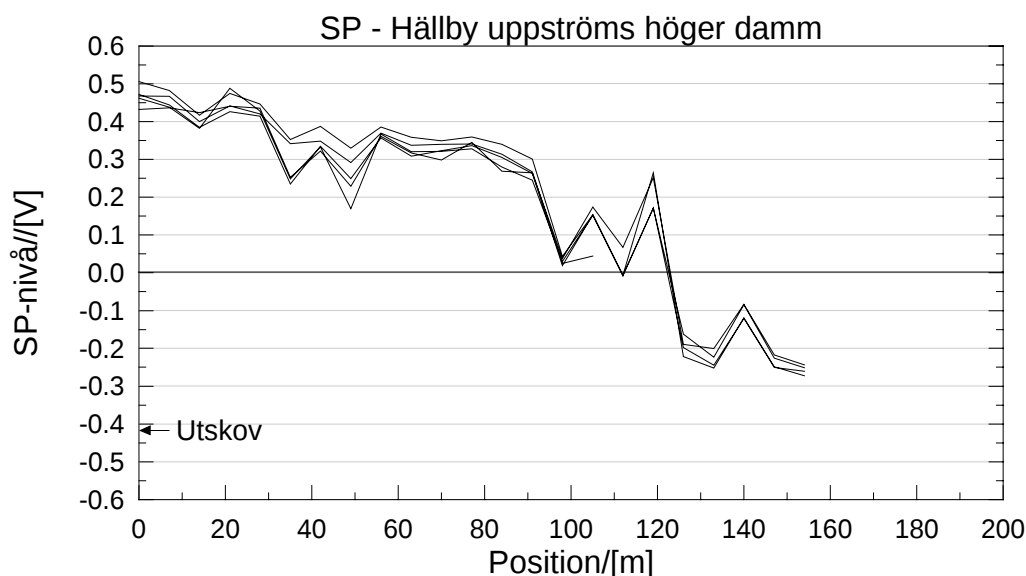
På grund av ett fel i protokollfilerna har vi endast en kort tidsserie med SP, vilka presenteras som veckomedianer för perioden 1997-10-02 till 1997-11-11 vilket ger fem uppsättningar. Diagrammen visar SP-data enligt följande:

- Uppströms höger damm (Figur 35)
- Höger dammkrön (Figur 36)
- Nedströms höger damm (Figur 37)
- Uppströms vänster damm (Figur 39)
- Vänster dammkrön (Figur 40)

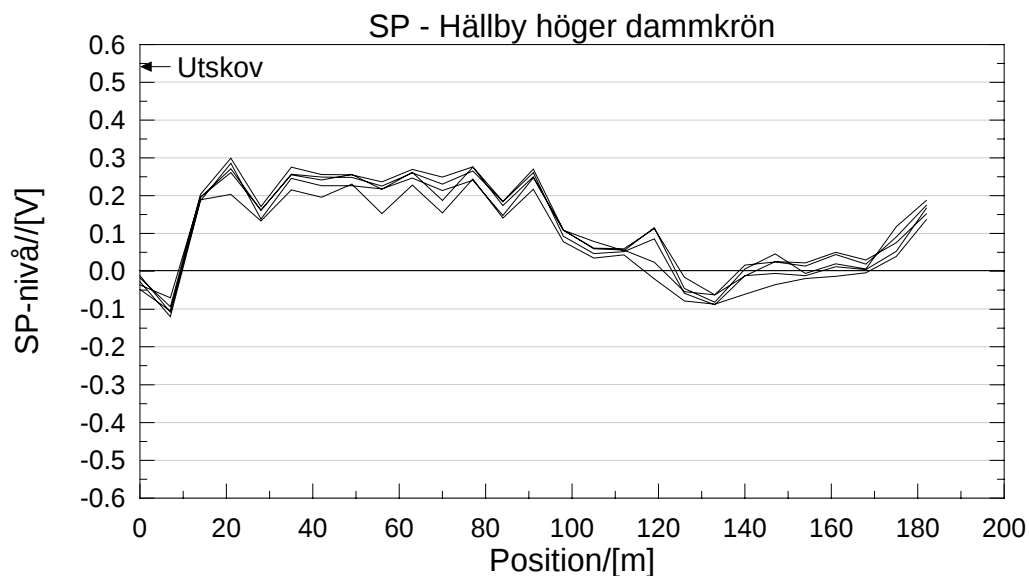
Resultaten är generellt sett ganska stabila, med undantag för en påtaglig förändring av de uppmätta potentialerna närmast utskovet nedströms höger damm där en tydlig sjunkande tendens gör sig gällande, jfr Figur 37 och Figur 38.

Betraktande av uppmätta data fäster särskilt uppmärksamheten på mätlinjen uppströms vänster damm, och den kraftiga förändringen från positiva till negativa potentialer 40-50 meter vänster om anslutningen till betongkonstruktionen. Amplituden på förändringen är här nästan 0,9 V. Dock förekommer stora variationer även på de andra mätlinjerna även om gradienten inte är lika kraftig, t.ex. varierar de uppmätta potentialerna med drygt 0,7 V längs linjen uppströms höger damm.

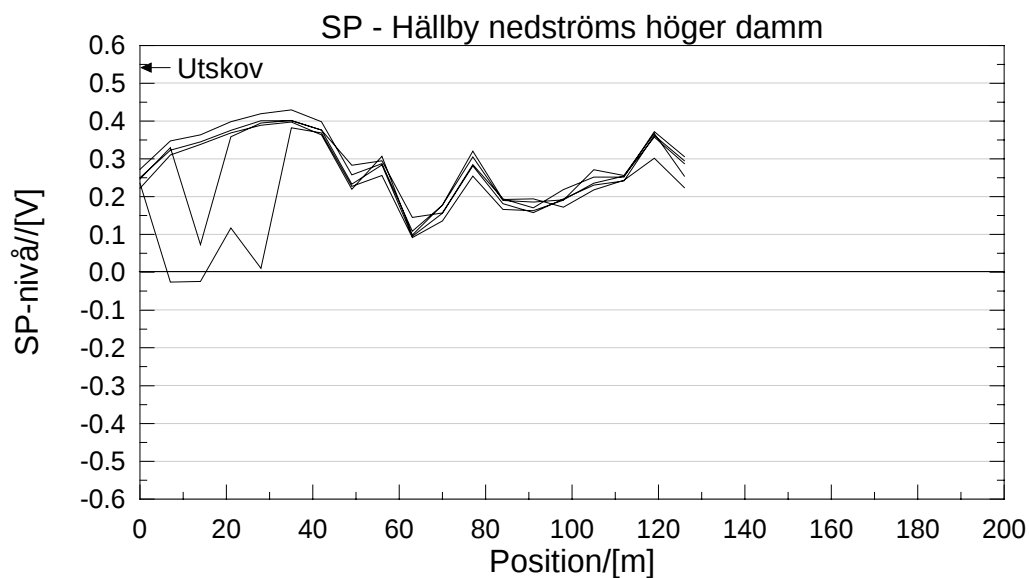
Variationen längs de andra mätlinjerna är mera gradvis, men påtagliga variationer är uppenbara även längs dessa.



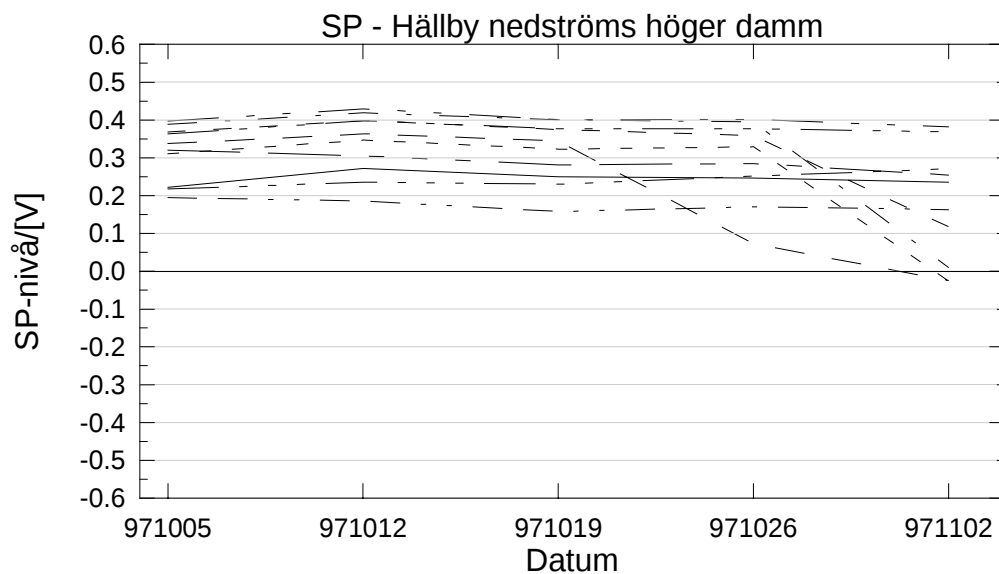
Figur 35 SP-data från uppströms höger damm, veckomedianer på data från 1997-10-02 till 1997-11-11.



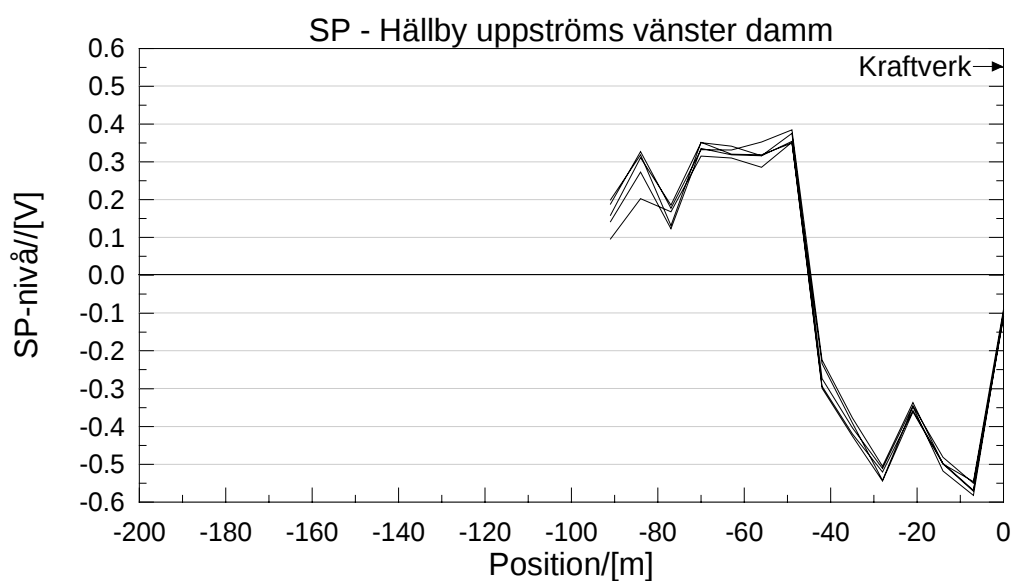
Figur 36 SP-data från höger dammkrön, veckomedianer på data från 1997-10-02 till 1997-11-11.



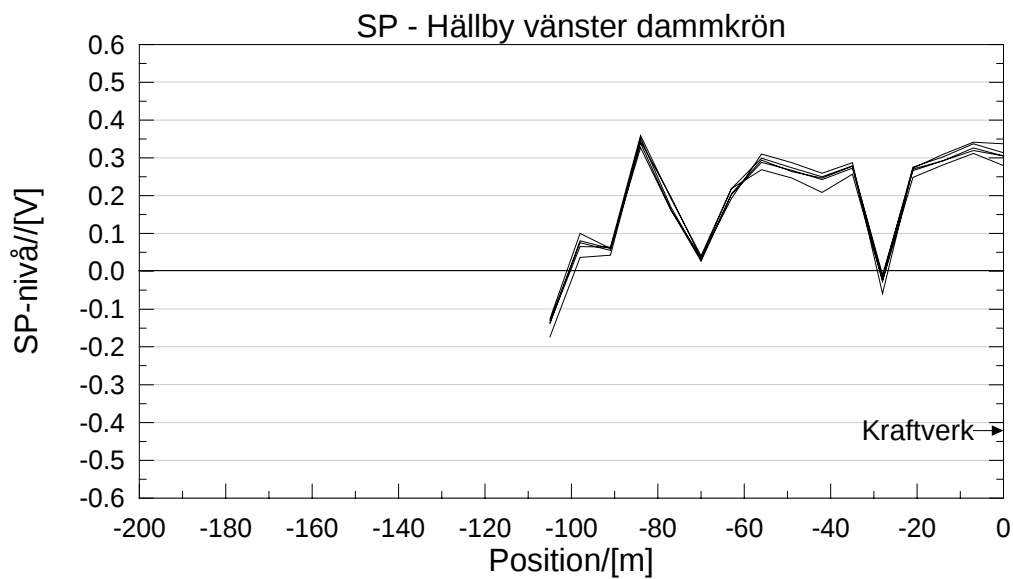
Figur 37 SP-data från nedströms höger damm, veckomedianer på data från 1997-10-02 till 1997-11-11. De avvikande resultaten närmast utskovet härrör från de två senast mättillfällena, med successiv minskning av uppmätta potentialer.



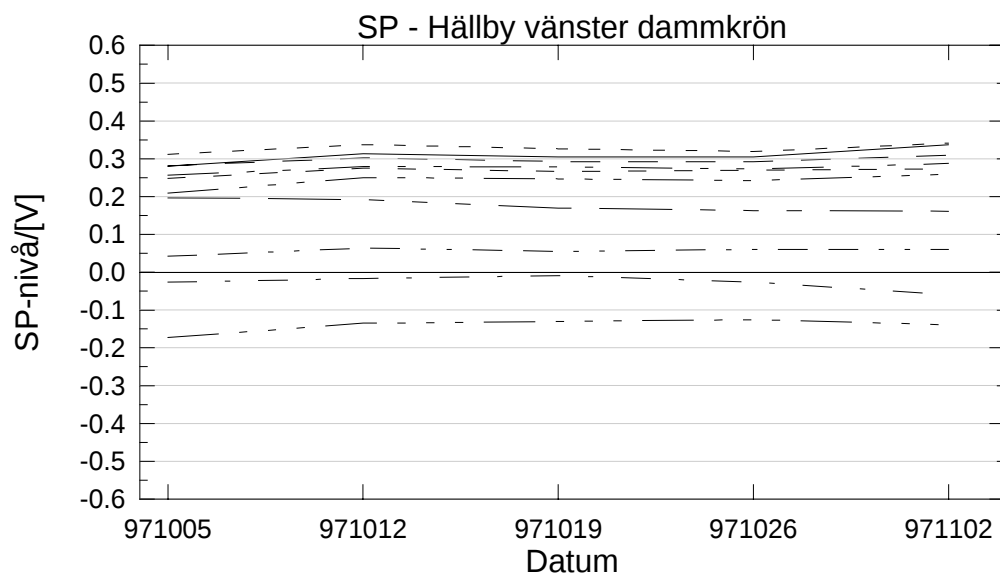
Figur 38 Tidsvariation för veckomedian av SP-data i några av punkterna nedströms höger damm.



Figur 39 SP-data från uppströms vänster damm, veckomedianer på data från 1997-10-02 till 1997-11-11.



Figur 40 SP-data från vänster dammkrön, veckomedianer på data från 1997-10-02 till 1997-11-11.



Figur 41 Tidsvariation för veckomedian av SP-data i några av punkterna på vänster dammkrön

8 Diskussion/Utvecklingspotential

8.1 Resultat

Tolkade resistiviteter i höger damm är relativt höga (några till åtskilliga tusen Ωm) i de övre delarna av dammkroppen, men lägre resistiviteter (under 400 Ωm) syns mot djupet. Någon entydig orsak kan ej ses för närvarande utan följande förslag är möjliga; naturlig låg resistivitet i berget som dammen grundlagts på, cementinjektering i grundläggningen, eller jordlina/kablar.

Resistiviteterna nedströms höger damm är mycket höga (tiotusen Ωm och mera) i de övre delarna, men på cirka 10-20 meters djup visar tolkningen på resistiviteter som kan krypa under 1000 Ωm . Detta skulle kunna tolkas som en svaghetszon i berget.

SP-resultaten uppströms höger damm och på dammkrönet antyder att det skulle kunna finnas en inströmningszon för läckage vid höger anslutning, som ligger längst bort från kraftverksbyggnaden.

Resistiviteterna i vänster damm är betydligt lägre än i höger damm, där de låga resistiviteterna återfinnes ovan grundläggningsnivån/bergnivån. Dessa låga resistiviteter torde ej bero på den injektering som utfördes 1987 för att hejda det läckage som lett till sjunkhål eftersom denna endast utfördes intill intaget. Bentonit bör annars leda till en signifikant sänkning av resistiviteten. Det kan noteras att låga tolkade resistiviteter finns i ett ca 40 m långt område närmast intaget (ungefärligt djup 10-20 meter). Den kraftiga negativa SP-anomalin, som också förekommer i samma område, kan tolkas som förhöjt läckage genom dammen.

Uppströms dammen är det i dagsläget inte möjligt att tolka resistiviteterna till följd av att inmätning av elektrodpositionerna ej gjorts, men detta kan naturligtvis göras i efterhand om inmätning skulle utföras.

8.2 Mätkvalitet

Datakvaliteten är nästan genomgående av utmärkt kvalitet för båda mätlinjerna uppströms dammarna. Detta torde bero på den goda elektrodkontakten för dessa linjer.

Mätdata lider av frekventa störningar för vänster dammkrön och nedströms höger damm, dock resulterar medianfiltrering i en ganska hygglig datakvalitet. För höger dammkrön är dock störningarna så stora att medianfiltreringen ej räcker till för att ge acceptabel datakvalitet.

Tänkbara orsaker till är att mätfelen är högre på höger damm än vänster är:

- Längre elektrodutlägg ger längre maximala elektrodavstånd med åtföljande sämre signal-brusförhållande.
- Längre blankkabel in till instrumentet ger större risk för påverkan av yttre störningar samt kapacitiv koppling i kablarna.

En bättre elektrodkontakt är nödvändig på höger dammkrön om acceptabel datakvalitet skall uppnås. Detta skulle eventuellt kunna uppnås genom att driva ned elektrodspetsar i tåtkärnans övre del med hjälp av en geoteknisk sonderingsutrustning. Ett idealt tillfälle att säkerställa en god elektrodkontakt föreligger i sådana fall när en höjning av tåtkärnan är planerad, då man kan lägga in elektroder direkt i tåtkärnans överkant. Det är troligt att kapillärl stigning i kombination med en mindre risk för tjälning kring elektroderna vintertid skulle leda till väsentligt bättre datakvalitet.

Skärmade ledningar till elektrodablarna skulle också möjligen kunna tänkas minska störningarna i denna speciella miljö, dock finns det en betydande risk att störningarna inte har sådant ursprung att detta hjälper.

8.3 Mätmetodik

Mätning med Wennerkonfiguration ger otillräcklig djupnedträngning, men är bra som referens eftersom det är en välkänd konfiguration som ger ett bra signal-brusförhållande. Konfigurationen synes också ge förhållandevis stabila mätvärden.

Pol-dipolmätning ger betydligt bättre djupnedträngning. Det finns möjlighet att lägga in avsevärt fler mätkombinationer i protokollfilerna än vad som varit fallet hittills, dock med reservation för begränsningar i tillgänglig mättid under dygnet. Det är dock tänkbart att det vore en god idé att utelämna Wennermätningarna till förmån för fler pol-dipolmätningar, men då borde man också mäta reciproka sådana (jfr avsnitt 4.5.1). Utvärderingen av resultaten påverkas dock troligen av att "fjärrelektroden" inte ligger tillräckligt långt borta i detta fallet, till följd av de skadade fjärrelektrodablarna. Det är önskvärt att ersätta en fjärrkabeln med en kraftigare kabel med tanke på pol-dipolmätningarna.

Mätningarna med kombinerad Wenner-Schlumbergerkonfiguration ser lovande ut, de ger en bättre upplösning och djupnedträngning än enbart Wennermätning (se exempel i Figur 42). Dock är det i det här fallet tveksamt om man skall använda tid för detta på bekostnad av fler pol-dipolkombinationer, eftersom instrumentet endast kan mäta en kanal åt gången. Med ett mätsystem utformat för simultan mätning i flera kanaler skulle detta inte vara någon begränsning.

Pol-polmätningar kan ej genomföras på grund av defekta fjärrelektrodablarna. Dock skulle det troligen ändå vara så stora mätstörningar att resultaten skulle bli svåra att använda.

Mätningar med 3D konfigurationer bör genomföras, genom mätning på elektrodkombinationer mellan olika mätlinjer. Detta kan ske genom att lägga in nya mätprotokoll på mät datorn.

8.4 Databearbetning

En kraftfull förbättring av resistivitetsdatakvaliteten, uttryckt som mät fel beräknade med hjälp av reciproka mät data, kan erhållas med medianfiltrering i tiden. Datakvaliteten

förbättras generellt sett om medianfiltreringen sker över en längre tidsbas, exempelvis två veckor istället för en vecka.

Mätning av reciproka data för samtliga mätkombinationer skulle göra det möjligt att beräkna mätfelen för varje enskilt datavärde, och endast godkänna de mätvärden som har mätfel under en viss nivå (t.ex. en procent). I fallet Hällby skulle mättiden bli kritisk med nuvarande systeminställning, dvs det skulle inte vara möjligt att hinna med alla mätningarna inom dygnet samt ge tid för elektroderna att stabiliseras inför SP-mätningen. Man kan dock tänka sig att endast mäta en mätcykel per mätkombination istället för minst två som är fallet idag, eftersom man då skaffar sig kontroll över datakvaliteten genom reciproka mätningar, varvid det vore möjligt.

En annan möjlig väg till att endast välja ut mätdata av tilläckligt god kvalitet inför fortsatt bearbetning vore att endast tillåta en viss maximal variation mellan näraliggande tidpunkter, dvs någon form av så kallade ”predictive filtering”. Man skulle då eventuellt kunna använda årsmedianvärden som startvärden.

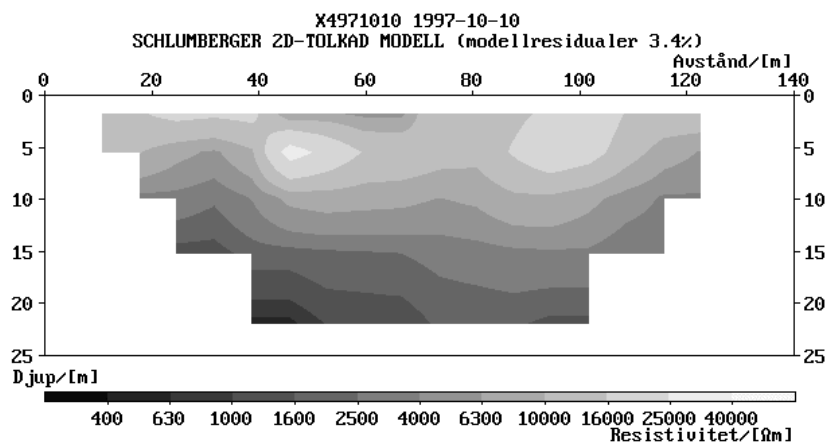
En ytterligare möjlighet som det ej funnits utrymme att testa inom detta projekt är låsning av modellparametrar i delar av de tolkade sektionerna. Man kan tänka sig att låsa fast exempelvis resistiviteter för alla modellceller under en viss nivå (exempelvis för de celler som är belägna i berget) så att egenskaperna i dessa inte tillåts variera. Detta torde också kunna bidra till att stabilisera resultaten.

Mätning av flera datapunkter per sektion är ytterligare ett sätt att få bättre grepp om datakvaliteten. Genom att ha flera datapunkter i varje dataset som används för den inversa modelltolkningen minskar man osäkerheten i bestämningen av modellparametrarna, och kan förbättra upplösningen. Som nämnts ovan kan man tänka sig fler elektrodpermutationer inom pol-dipolprotokollen och kombinerad tolkning Wenner + Schlumberger. Det vore också tänkbart att kombinera alla dessa elektrodkonfigurationer i samma modelltolkning, men detta finns det för närvarande ej stöd för i det använda tolkningsprogrammet.

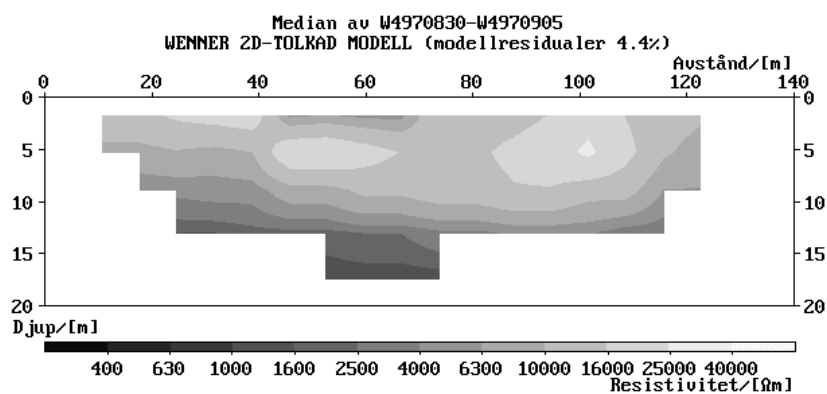
Det är önskvärt att göra känslighetsanalyser på de tolkade modellerna, för att ett mått på hur välbestämda modellparametrarna i den tolkade modellen är. Detta har det dock inte funnits möjlighet att genomföra här.

Inmätning av undervattenselektroderna måste göras om en fullständig utvärdering av uppströmsdata skall kunna ske. Detta kräver insats av dykare, där en dag torde räcka.

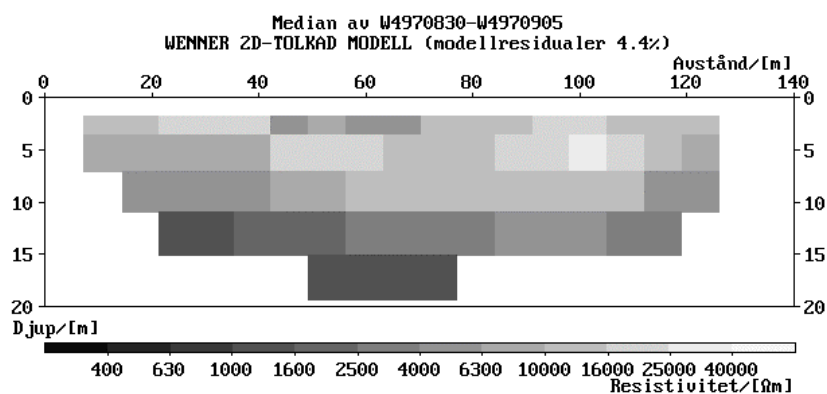
a)



b)



c)



Figur 42 Exempel på tolkade modellsektioner (från nedströms höger damm) baserade på: a) Schlumberger-Wennerdata b) Wennerdata uppritad som kontinuerlig funktion, c) Wennerdata med de enskilda modellcellerna uppritade.

Utvärderingsmetodikerna för vattenströmningen bör också förbättras. Önskvärt vore att utveckla en förbättrad matematisk modell där både värme- och spårämnestransport kan simuleras.

8.5 Datapresentation

Mätningarnas omfattning och frekvens medför en stor datamängd som dessutom bearbetas i flera steg. I ett tänkt framtida övervakningssystem är det därför viktigt att endast efterfrågad information presenteras, främst flödet genom dammen. I detta projekt har däremot de olika stegen presenterats, vilka måste vara möjliga att ta fram även i ett framtida system så att beräkningarna kan kontrolleras.

Presentation av de tolkade modellerna kan göras genom uppritning av blocken i modellerna (se exempel Figur 42c) istället för kontinuerliga uppritningar typ pseudosektion (Figur 42b). Detta ger egentligen en korrektare bild av den tolkade modellen. Det kan i detta sammanhanget nämnas att cellernas längd och höjd har valts automatiskt av tolkningsprogrammet, och indelningen är beroende av datatätheten i indata så att en högre datatäthet ger mindre modellceller. En högre geometrisk upplösning skulle kunna erhållas genom att kombinera data från olika elektrodkonfigurationer.

Tidsvariationen i de tolkade modellerna kan också åskådliggöras med datoranimering, genom att visa en tidssekvens av tolkade modeller som en film. Härigenom kan man få en bra överblick över variationens storlek och i vilka partier av sektionerna som den största variationen sker inom. Sådana animeringar har gjorts inom projektets ram. Tidsvariationen för enstaka celler ska också kunna visas på ett enkelt sätt.

8.6 Självpotential (SP)

Det är inte möjligt att dra några långtgående slutsatser ur SP-data i dagsläget till följd av den korta tidsserien. Det kan dock konstateras att det är möjligt att erhålla data som är stabila efter medianfiltrering med hjälp av fast installerade elektroder i syrafast stål. Resultaten av data uppmätta med denna typ av elektroder har ej jämförts med resultat från så kallade icke-polariserbara elektroder i denna tillämpning, de senares konstruktion ger dock farhågor för långtidsstabiliteten varför det vore en avgörande fördel om man kan få tillräckligt bra data med hjälp av stålelektroder vid fast installation. Vidare är det ej möjligt att använda icke-polariserbara elektroder för att sända ström. Det vore klart motiverat med ytterligare studier kring denna fråga.

9 Slutsatser

Ett system för dammövervakning baserat på automatisk resistivitetsmätning har utvecklats och installerats i Hällbydammen. Systemet fungerar stabilt och ger dagliga mätresultat sedan över ett år. Såväl hårdvara som programvara har anpassats och vidareutvecklats speciellt för denna tillämpning, det finns dock en betydande potential för fortsatt utveckling. Vidare har programvara i prototyputförande utvecklats som möjliggör mer eller mindre helt automatiserad bearbetning av mätdata i framtida system.

Datakvaliteten är hos obearbetade mätdata otillfredsställande, men genom tidbasfiltrering kan datakvaliteten förbättras vilket resulterar i relativt tillfredsställande data förutom för höger dammkrön. Ytterligare vägar till förbättring av datakvaliteten torde vara dels mättekniska där bland annat bättre elektrodkontakt på dammkrön ingår, dels olika former av mera intelligent databearbetning. Beträffande elektrodkontakten kan det konstateras att i sådana fall en höjning av tatkärnan är planerad, vore detta ett unikt tillfälle att säkerställa en god elektrodkontakt genom att lägga in elektroder direkt i tatkärnans överkant.

Utvärderade resistiviteter visar en säsongsvariation. Denna påverkas av tjälning, variationer i vattenhalt och vattennivå i dammen, men en väsentlig del är en följd av vattenflödet genom dammen med varierande temperatur. Mätfelen är i vissa fall större än förmodad säsongsvariation vilket försvårar utvärderingen av vattenströmningen genom dammen. Detta gäller speciellt för en automatisk utvärdering. I de sektioner där mätnoggrannheten är tillfredsställande har automatisk utvärdering kunnat göras med rimliga resultat som följd. Det är dock tveksamt om mätningarna har sådan stabilitet att ett automatiskt system kan installeras baserat på det första årets erfarenheter. För att kunna erhålla ett helt automatiskt system för läckageövervakning behöver både mät- och utvärderingsmetodik utvecklas ytterligare.

Utvärdering av flödet har endast gjorts baserat på fasförskjutningen av resistivitetspulsen i magasinet. Det bör dock noteras att mätningarna i magasinet först finns från 1997. Hurdan pulsen var under 1996 är dessvärre oklart. Tyvärr måste vi därför anta att pulsen var likadan under 1996 och att den gett upphov till de variationer som uppmäts i dammen. Någon utvärdering av amplituden har ej kunnat göras beroende dels på de stora resistivitetsvariationer som uppmäts samt osäkerheten av resistivitetspulsen i magasinet.

Mätningen av SP-data tycks ge resultat som är relativt stabila efter medianfiltrering, vilket är lovande med tanke på att SP-data blir "bonus" som man kan få från resistivitetsmätsystemet. Det stabila resultatet är också intressant eftersom SP-mätningar helst bör utföras med icke-polariserbara elektroder. Om de använda rostfria elektroderna även kan användas för SP-mätningar skulle det medföra en förenkling av SP-mätningar. På grund av den korta tidsserien kan man ännu inte dra några mera vittgående tolkningar och slutsatser av SP-data.

Den kraftiga negativa SP-anomalin närmast kraftverket uppströms vänster damm är dock anmärkningsvärd. Den kan tolkas som en inströmningszon, vilket skulle tyda på att vattenströmningen är högre närmast intaget. Denna tolkning stöds av att resistivitetsvariationen enligt pol-dipolmätningarna är högre närmast kraftverket än i övriga sektionen.

Trots de mättekniska problem som förekommit (speciellt på höger dammkrön) styrker mätningarna de resultat som erhållit vid de tidigare mätningarna från Lövön och Moforsen, nämligen att:

- mätmetoden kan användas för att registrera vattenströmningen genom en damm,
- vattenströmningen i vissa fall kan kvantifieras,
- metoden kan installeras i befintliga dammar för kontinuerlig mätning utan alltför stora ingrepp.

Metoden kan därför i framtiden bli ett alternativ för läckagemätning i dammar där konventionell flödesmätning ej går att genomföra.

10 Referenser

- Claesson, J., m fl. (1985) *Markvärme- En handbok om termiska analyser*, Statens råd för byggnadsforskning T17:1985, Stockholm, ISBN 91-540-4463-4.
- Dahlin, T. and Loke, M.H. (1997) Quasi-3D resistivity imaging: mapping of 3D structures using two dimensional DC resistivity techniques, Procs. 3rd Meeting Environmental and Engineering Geophysics, Aarhus, Denmark, 8-11 September 1997, p 143-146.
- Dahlin, T. (1993) *On the Automation of 2D Resistivity Surveying for Engineering and Environmental Applications*, Ph.D.Thesis, ISRN LUTVDG/TVDG--1007--SE, ISBN 91-628-1032-4, Lund University, 187p.
- Dahlin, T. (1996) 2D resistivity surveying for environmental and engineering applications, *First Break*, vol 14, no 7, p 275-283.
- ICOLD, (1983), *Deterioration of dams and reservoirs - Examples and their analysis*, ISBN 2-86812-001-6, 367 p.
- ICOLD, (1995), *Dam Failures Statistical Analysis*, Bulletin 99, ISSN 0534-8293, 73 p.
- Johansson, S. (1997), *Seepage Monitoring in Embankment Dams*, Doctoral Thesis, TRITA-AMI PHD 1014, ISBN 91-7170-792-1, Royal Institute of Technology, Stockholm.
- Johansson, S. och T. Dahlin (1995) *Övervakning av tät kärnas funktion genom analys av resistivitetsvariationer*, VASO Dammkommitté rapport nr 24, Stockholm, ISSN 1400-7827.
- Johansson, S. and Dahlin, T. (1996) Seepage monitoring in an earth embankment dam by repeated resistivity measurements, *European Journal of Engineering and Environmental Geophysics*, vol 1, no 3, p 229-247.
- Johansson, S., Barmen G., Bartsch, M., Dahlin, T., Landin, O. och Ulriksen, P. (1995) *Nyare metoder för tillståndskontroll av dammar*. VASO Dammkommitté rapport nr 21, Stockholm, ISSN 1400-7827.
- Loke, M.H. and Barker, R.D. (1996) Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method, *Geophysical Prospecting*, vol 44, no 1, p 131-152.
- Overmeeren, R.A. van och Ritsema, I.L. (1988) Continuous vertical electrical sounding, *First Break*, vol 6, no 10, p 313-324.
- Palacky, G.J. (1987) Resistivity characteristics of geologic targets, in *Electromagnetic methods in applied geophysics*, ed. M.N. Nabighian, *Soc. of Expl. Geoph.*, Tulsa, p 53-130.
- Parasnis, D.S. (1986) *Principles of applied geophysics*, 4:th ed, Chapman and Hall, London, 402p.

- Robinson, E.S. and Coruh, C. (1988) *Basic Exploration Geophysics*, Wiley, New York, 562p.
- Triumf, C-A, Thunehed, H., Enström, A. (1995) *Övervakning av tåtkärnans funktion genom mätning av självpotential- och resistivitmätning*. VASO Dammkommitté rapport nr 23, Stockholm, ISSN 1400-7827.
- Ward, S.H. (1989) Resistivity and Induced Polarization Methods, in *Investigations in Geophysics no. 5: Geotechnical and Environmental Geophysics, vol I*, ed. S. Ward, Society of Exploration Geophysicists, Tulsa, p 147-189.

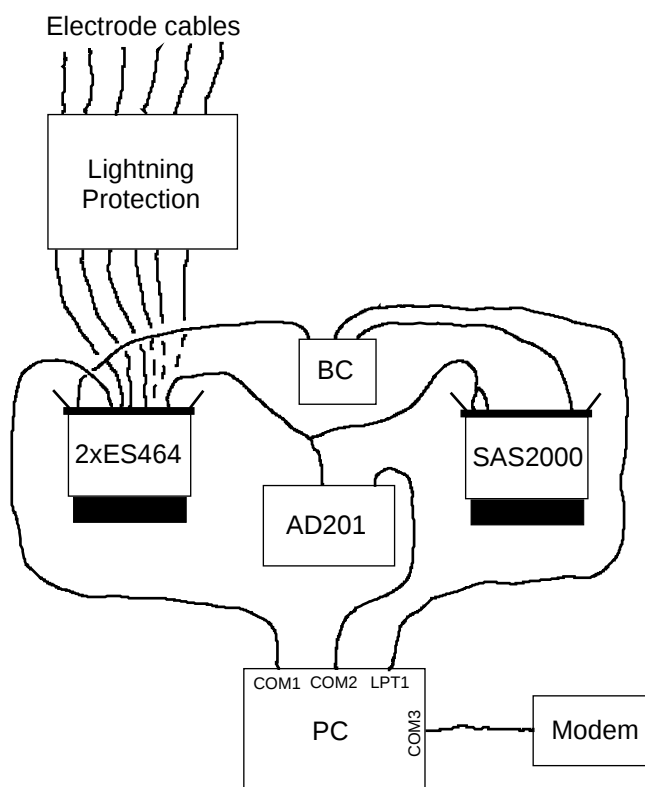
11 Bilagor

A Dokumentation av mätsystemet

A.1 UTFORMNING AV MÄTSYSTEMET

Mätsystemet är uppbyggt kring ABEM Lund Imaging System, som är en vidareutveckling av ett system utvecklat vid LTH (Dahlin 1993; Dahlin 1996). Lund Imaging System består av:

- resistivitetsinstrument Terrameter SAS300C,
- eventuell extra strömförstärkare Booster SAS2000,
- reläomkopplingsenhet Electrode Selector ES464,
- dator,
- elektrodkablar,
- stålelektroder i form av ”stålspjut”,
- diverse kopplinganordningar.



Figur 43. Systemskiss över mätsystemets huvudkomponenter. Varje enhet är försedd med separat strömförsörjning, förutom åskskyddet som är passivt. Vidare ingår ett tidur som bryter strömmen vid midnatt varje dygn. Förklaring till använda beteckningar: ES464 = 2 st omkopplingsenheter, BC = kontroll/styrenhet för strömsändare, SAS2000 = strömsändare, AD201 = voltmeter/AD-omvandlare, PC = dator.

Ett antal modifieringar och kompletteringar har dock gjorts i hårdvaran i förhållande till standardutförandet av mätsystemet, se systemöversikt i Figur 9, varav följande är de viktigaste:

- voltmeter/AD-omvandlare AD201 ersätter resistivitetsinstrumentet,
- styrenhet (Booster Controller) som styr strömförstärkaren,
- åsskydd,
- elektrodkablar med s.k. "pig-tail outlets",
- plattelektoder (på land) och ringelektroder (i vatten),
- modem för fjärrstyrning och dataöverföring,
- tidur som bryter strömmen en gång per dygn för omstart av datorn.

Figur 44 visar reläenheter, A/D-omvandlare och strömförstärkare, medan Figur 45 visar mätsystemet på plats i ett 19" mätskåp inne i kraftverksbyggnaden. Andra delar i systemet visas i fotografier som följer.

Det kan noteras att ett nytt mätinstrument som integrerar strömförstärkaren med en 4-kanals högupplösande voltmeter, och som även har en inbyggd dator har kommit ut på marknaden nyligen. Detta kan reducera mängden apparater som krävs för framtida installationer väsentligt, och tack vare en robust utformning torde mätsystemet kunna installeras i någon form av mätskåp ute.

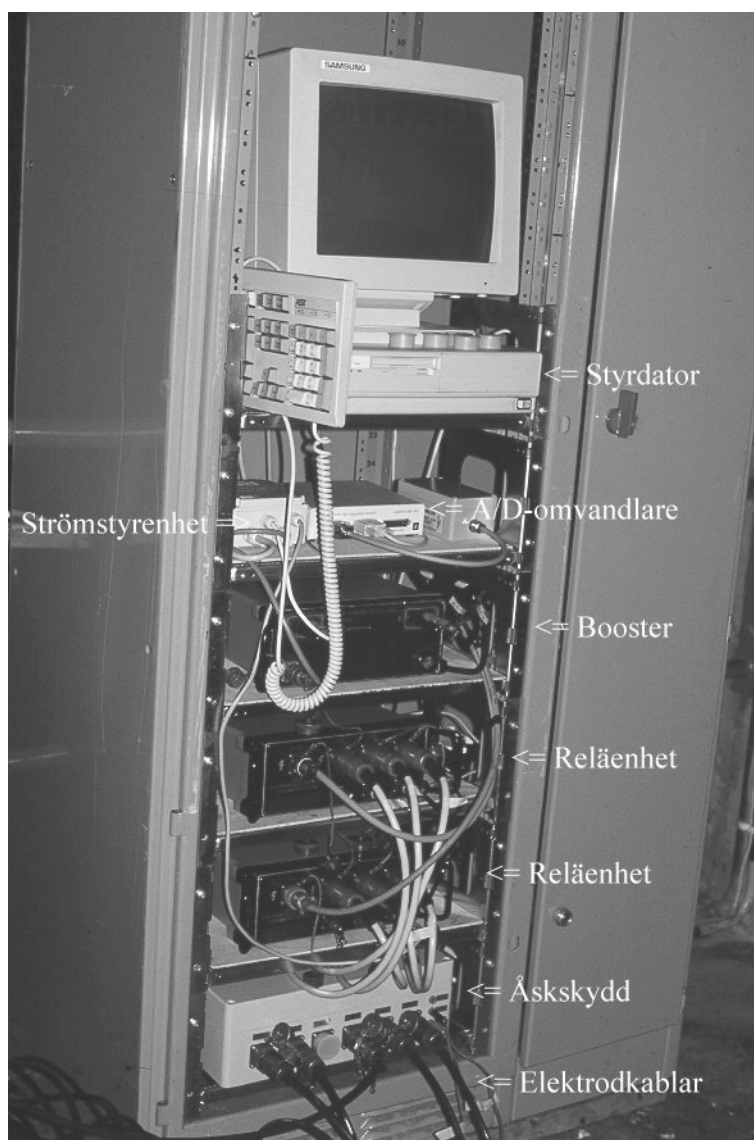


Figur 44. Omkopplingsenheter, strömsändare och A/D-omvandlare/voltmeter.

A.2 INSTRUMENT OCH DATOR

Omkopplingsenheter

För omkoppling mellan de olika elektrodkombinationerna används 2st ABEM Electrode Selector ES464, som vardera har 4x64 kanalers omkoppling. Detta ger möjlighet att ansluta upp till 128 elektroder, som var och en kan användas som strömelektrod 1 eller 2, eller spänningselektrod 1 eller 2. Omkopplingsenheterna är kopplade i serie till serieport 1.



Figur 45. Mätsystemet på plats i kraftverksbyggnaden i ett 19" mätskåp.

Strömsändare

Som strömsändare vid resistivitetsmätningen används en ABEM Booster SAS2000, vilken ger möjlighet att sända ut upp till 400V med upp till 0.5A. Boostern styrs av datorns parallelport via en anpassningsenhet.

Voltmeter/A/D-omvandlare

En Lawson Labs Model 201 24-bitars A/D-omvandlare/voltmeter mäter spänningarna. Den styrs via serieport 2.

Dator med modem

En standard PC (AST Bravo LP 4/66d bestyckad med Intel 486DX, 8MB RAM, 1GB hårddisk) används för att styra datainsamlingen, vilken utrustats med ytterligare en serieport för anslutning av modem. Modemet används för överföring av mätdata.

Ett tidur bryter strömmen varje dygn, så att datorn startas om. Detta utnyttjas för att initiera den aktuella dagens mätningar (se nedan), men är också av stor fördel om datorn hänger sig p.g.a. fel i programkörningar.

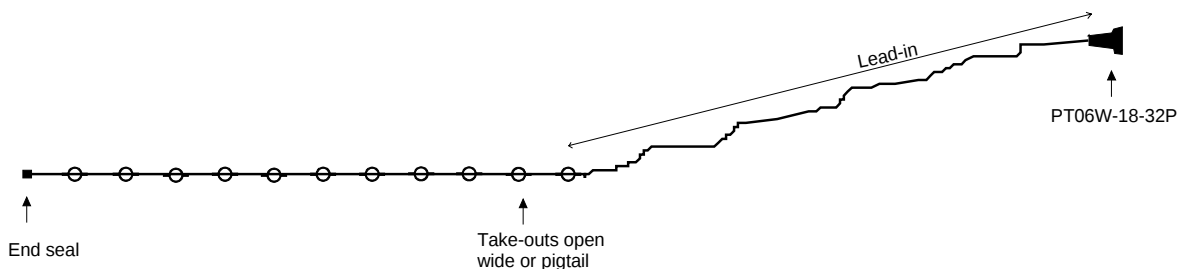
Installation

Mätutrustning och dator, med åskskydd enligt beskrivning nedan, är installerade i ett 19" rackskåp (Figur 45).

A.3 KABLAR OCH ELEKTRODER

Elektrodkablar

Flerledarkabel med mantel och ledarisolering i polyuretan används för att förbinda elektroderna längs dammen med omkopplingsenheterna, se principskiss i Figur 10. Kablarna är måttbeställda från Mark Products i Houston, och försedda med gjutna förgreningar, så kallade "pig-tail outlets", till elektroderna med 7 meters intervall. Kablarna har ett varierande antal elektrodanslutningar, och varierande längd på blankkabel för anslutning till omkopplingsenheterna, beroende på deras placering (se Tabell 1). Ena änden av kablarna är försedd med ett mångpoligt kontaktdon, medan den andra är förseglad.



Figur 46. *Principiell utformning av elektrodkablar, där samtliga elektroduttag är utformade som "pig-tail take-outs" i detta fallet.*

Nr.	Placering	Kabel typ	Uttags- och elektrodetyp	Antal uttag	Aktiv längd /[m]	Blankkab el/[m]	Total längd/[m]
1	Vänster krön	Land	Pig-tail platta +	16	105	65	170
2	Höger krön	Land	Pig-tail platta +	27	182	154	336
3	Vänster nedström	-	-	(2)	-	-	-
4	Höger nedström	Land	Pig-tail platta +	19	126	190	316
5	Vänster uppström	Under-vattnen	Pig-tail ring +	14	91	115	206
6	Höger uppström	Under-vattnen	Pig-tail ring +	24	161	195	356
Totalt				100(+2)	665	719	1384

Tabell 1. Sammanställning över elektrodablarnas och elektrodernas utformning, där c/c-avståndet mellan elektroderna är 7 meter genomgående. Den planerade kabel 3, vänster nedström, kunde ej utnyttjas p.g.a. svårforcerad terräng, utan ersattes av två enkelledare till elektroder i befintliga brunnar.

Kabeldragningen har utförts av driftspersonalen på Gulsele Kraft, och utförts med tanke på att skydda kabeln mot mekanisk påverkan. I möjligaste mån har kabelstegar och liknande använts där så varit möjligt, t.ex. hela vägen längs höger dammkrön. I utsatta lägen, t.ex. vid passage ned i magasinssvattnet för uppströmskablarna, har kabeln dragits i skyddande rör. På vänster dammkrön grävdes kabeln ned i vägbanan, medan den på höger nedströmssida skyddades med klavna plaströr innan den täcktes över med jordmaterial. Elektrodablarnas placering visas i plan och sektion i huvudrapporten.

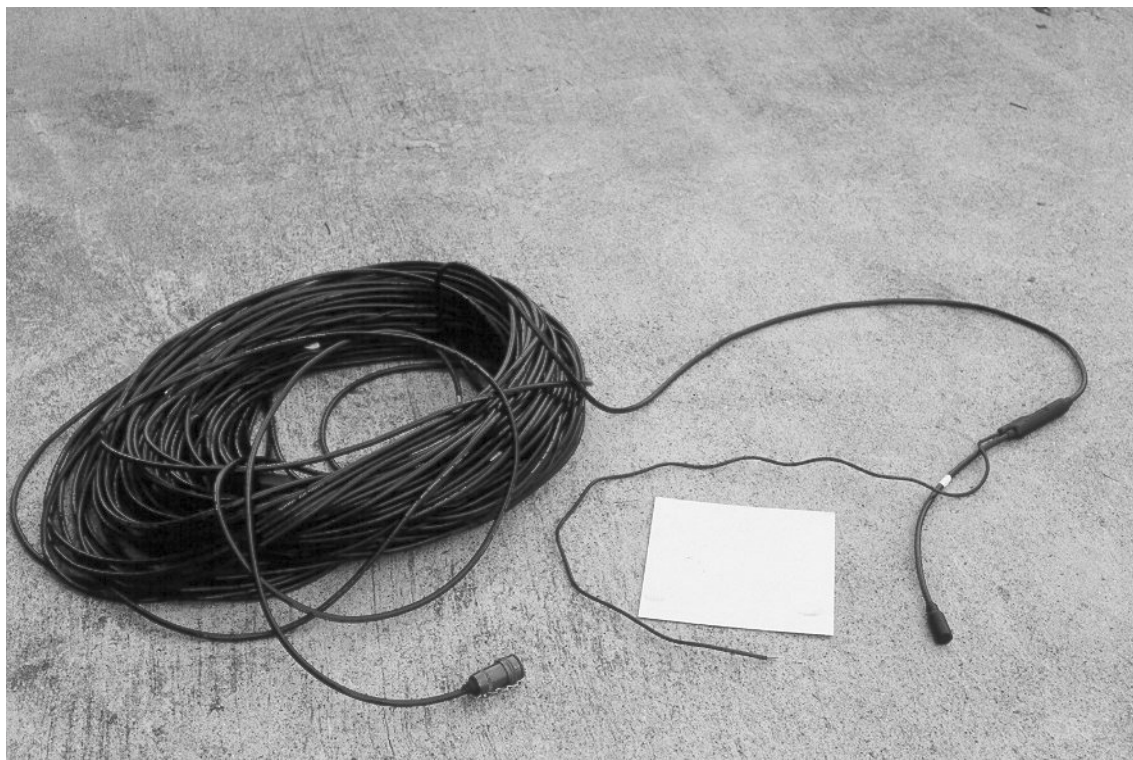
Markelektroder

Som markelektroder används 0,25m x 0,25m stora plåtar i syrafast stål, vilka är anslutna till en plastöverdragen tvinnad vajer i syrafast stål (Figur 47). Anslutningen har gjorts genom att vika ena hörnet på plåten över den skalade vikta vajeränden, och banka till med en hammare, vilket ger stark anslutning.

Elektroderna är nedgrävda på ett djup av cirka en meter. Installationen skedde med hjälp av traktorgrävare (Figur 48 och Figur 49). I botten av varje grop lades finkornigare

jordmaterial (finsand/silt), därefter lades stålplattan ned, därefter ytterligare finmaterial. Slutligen återfylldes gropen med ursprungligt material. Före återfyllningen trädde ett plaströr (s.k. elektrikerrör) över vajern för att skydda den mot vassa stenar (Figur 50 och Figur 11).

Stålvajern skarvas ihop med anslutningen från elektrod kabeln med hjälp av en skarvhylsa i förtent koppar, vilken pressas samman med hjälp av ett speciellt pressverktyg. Skarven lindades med smältlim och överdrogs med en krympslang med smältande insida.



Figur 47. Elektrod kabel och en elektrodplåt.



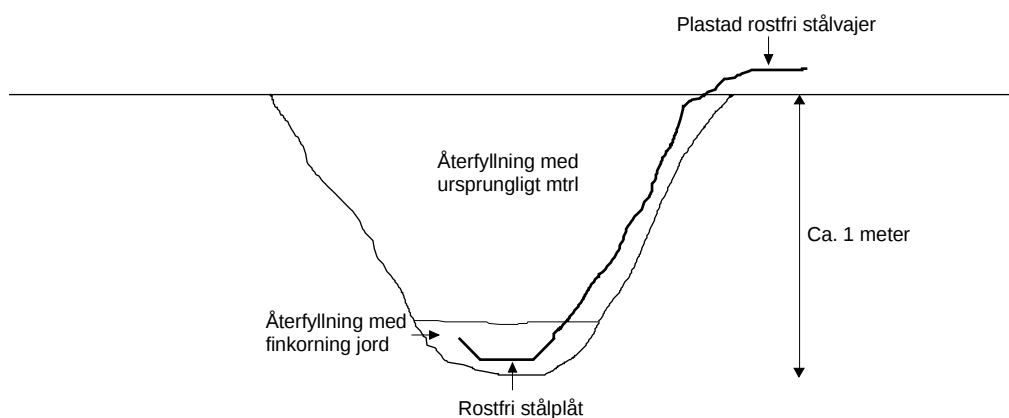
Figur 48. Grävning för installation av elektrod på höger dammkrön.



Figur 49. Grävning för installation av elektrod nedströms höger damm.



Figur 50. Anslutning mellan elektrod kabel lagd i vägräcket och nedgrävd elektrodplatta på höger dammkrön.



Figur 51. Principskiss som visar hur installationen av markelektroder skett. Före återfyllningen trädde ett stycke så kallat elektrikerrör över vajern för mekaniskt skydd (ej visat i skiss).

Undervattenselektroder

Ringar i syrafast stål tjänar som elektroder på undervattenskablar, med en diameter av 35 mm och längd av 67 mm. Ringarna är anpassade i storlek så de kunnat klämmas fast över elektrod förgreningarna på kablarna (Figur 52).



Figur 52. Detalj av elektrod kabel för undervattensinstallation med ringelektrod monterad.

Stålringarna har skarvats ihop med anslutningen från elektrod kabeln via en hylsa (ytterdiameter 4 mm) i syrafast stål som svetsats fast i ena änden av ringen, till vilken anslutningskabel löts. Skarvarna har lindats med smältlim och överdragits med en krympslang med smältande insida, för att ge en vattentät skarv. Undervattenskablarna med sina elektroder installerades av dykare, och förankrades genom att betongringar fästes vid dem.

Fjärrkablar

Enkelledarkabel med mantel i polyuretan ansluter fjärrelektroder till omkopplingsenheterna. En fjärrelektrod är placerad SV om kraftverket, med kabeln nedgrävd längs grusvägen som fortsätter åt nedströmshållet från änden av höger jorrdamm. Kabeln fortsätter ungefär 800 meter från änden av dammen, och är således cirka 1100 meter lång totalt. Den andra fjärrelektroden är nedsänkt i magasinet uppströms kraftverket, där kabel och elektrod med sänke lades ut från båt meter. Den exakta längden på denna kabel dokumenterades inte, men torde vara ungefär som för den på nedströmsidan.

Prob för temperatur och vattenresistivitet

En undervattensprob har konstruerats för mätning av magasinsvattnets temperatur och resistivitet (Figur 53). Proben är ansluten till mätsystemet på samma sätt som elektrodablarna. Proben byggdes i plexiglas som efter montering och anslutning fylldes

med gjutmassa för vattentät försegling. Efter test i vattenbehållare försågs den även med extra tyngd för att förbättra stabiliteten under vatten.

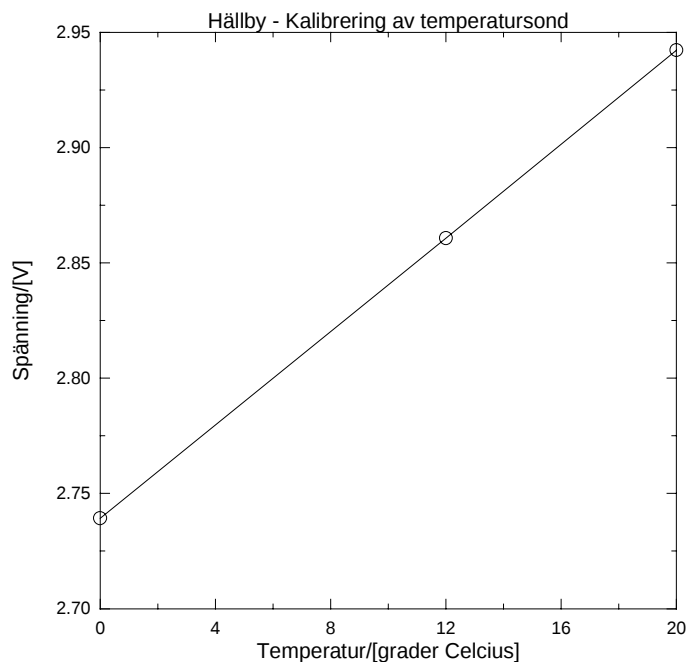


Figur 53. Undervattensprob för mätning av magasinsvattnets temperatur och resistivitet. Probens överdel byggdes efter att fotot togs in i en cylinder fylld med ballast för stabilisering under vatten.

Resistivitetsdelen består av fyra miniatyrelektroder arrangerade i rad med 20 mm mellan varje, avsedda för mätning med Wennerkonfiguration.

Temperatursensorn utgörs av en integrerad krets för temperturmätningar, vilken drivs av en 12V nätadapter. Spänningen över sensorn varierar linjärt med temperaturen, och spänningen mäts således av voltmeteren. En kalibrering i vattenbad gjordes i Lund, se kalibreringskurva i Figur 54, med en noggrannhet i kalibreringsvattnet på 0,1 °C. Kalibreringen gav följande samband mellan uppmätt spänning U och temperatur t :

$$t = 98,474 \cdot U - 269,74$$



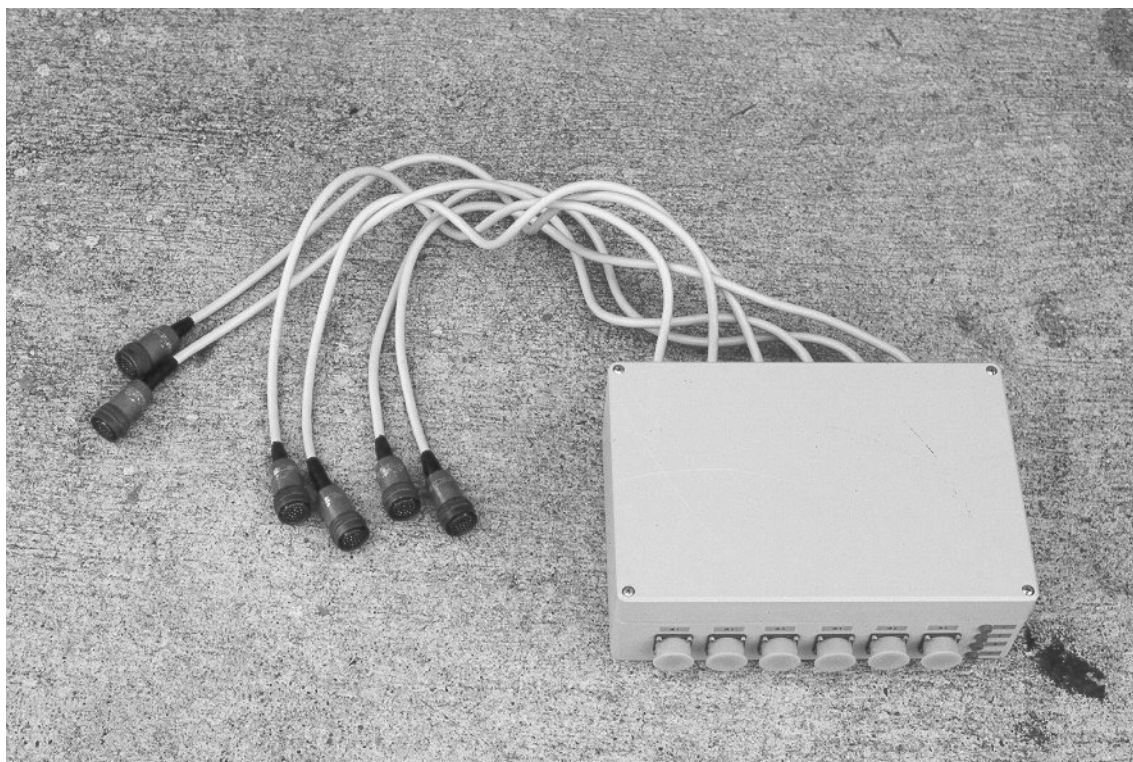
Figur 54. Kalibreringskurva för temperatursond (samma temperaturgivare har använts i andra tillämpningar av vår elektronikavdelning och befunnits ha mycket linjära egenskaper i detta intervall, därför nöjde vi oss med tre kalibreringspunkter).

ÅSKSKYDD

Före ingång till omkopplingsenheter

Ett specialanpassat åskskydd har utvecklats för att förhindra att mätutrustningen förstörs av överspänningar. Detta är uppbyggt kring gasurladdningsrör, och har ett gasurladdningsrör per elektrod i systemet. Åskskyddet har konstruerats och byggts vid LTH. Eftersom upp till 400V skall kunna sändas ut genom åskskyddet har det dimensionerats för 600V för att inte utlösas vid normal drift.

Åskskyddet har monterats i en jordad metallåda till vilken de inkommande elektrodkablar ansluts, för vidarekoppling till omkopplingsenheterna.



Figur 55. Åskskydd utformat för anslutning mellan elektrokablarna och omkopplingsenheterna.

Mellan omkopplingsenheter och mätinstrument

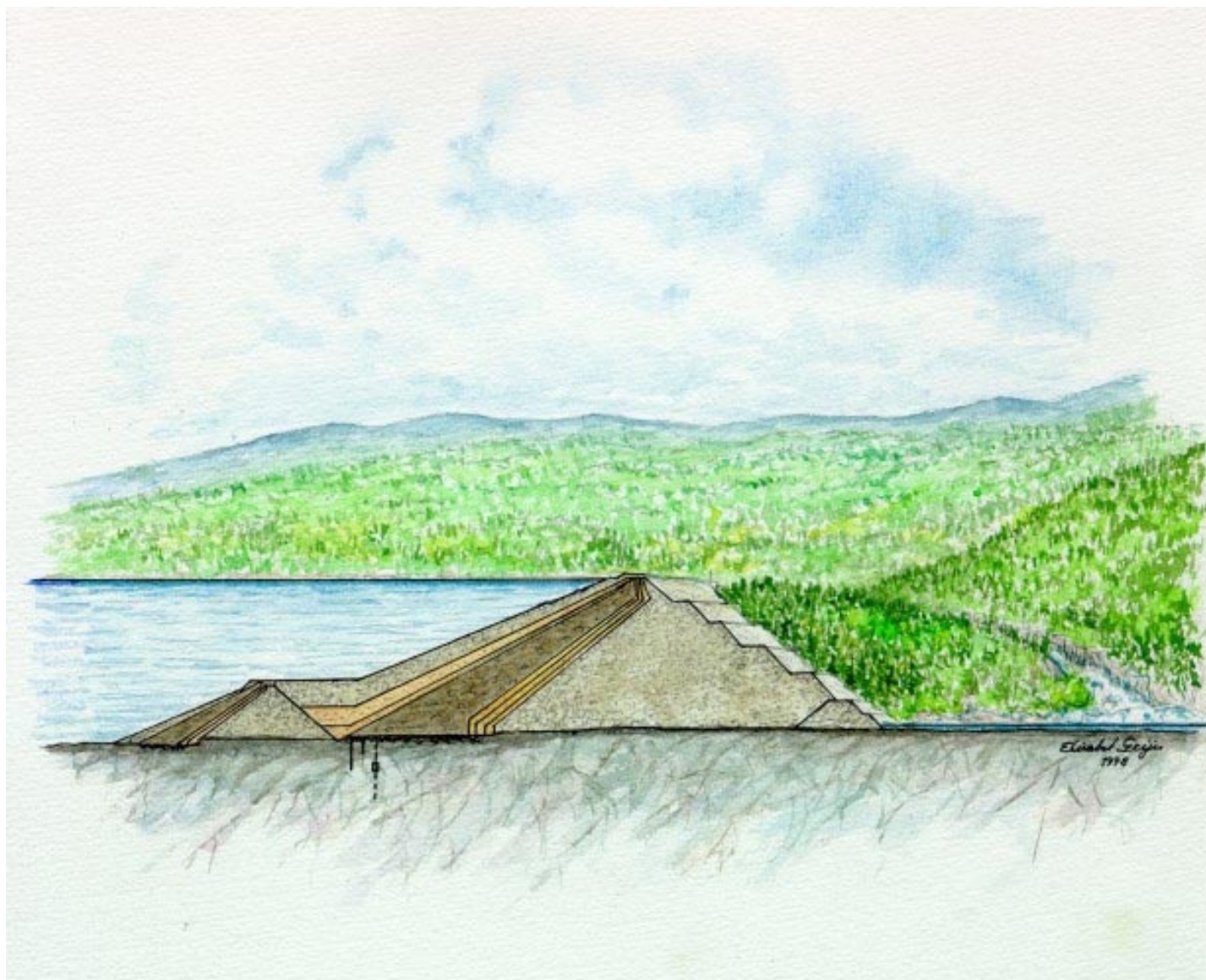
Ett extra åskskydd i form av gasurladdningsrör har monterats mellan reläomkopplingsenheterna och voltmetern, för att skydda voltmetern mot spänningar över 75V. Detta åskskydd har byggts in i den grenkabel som leder vidare från omkopplingsenheterna till voltmeter och strömförstärkare.

Teleanslutning

Teleanslutningen har försetts med ett transientskydd som köpts in färdigt.

Nätanslutning

Nätanslutningen har försetts med ett transientskydd som köpts in färdigt.



ELFORSK

SVENSKA ELFÖRETAGENS FORSKNINGS- OCH UTVECKLINGS - ELFORSK - AB
Elforsk AB, 101 53 Stockholm. Besöksadress: Olof Palmes Gata 31
Telefon: 08-677 2530. Telefax 08-677 2535
www.elforsk.se