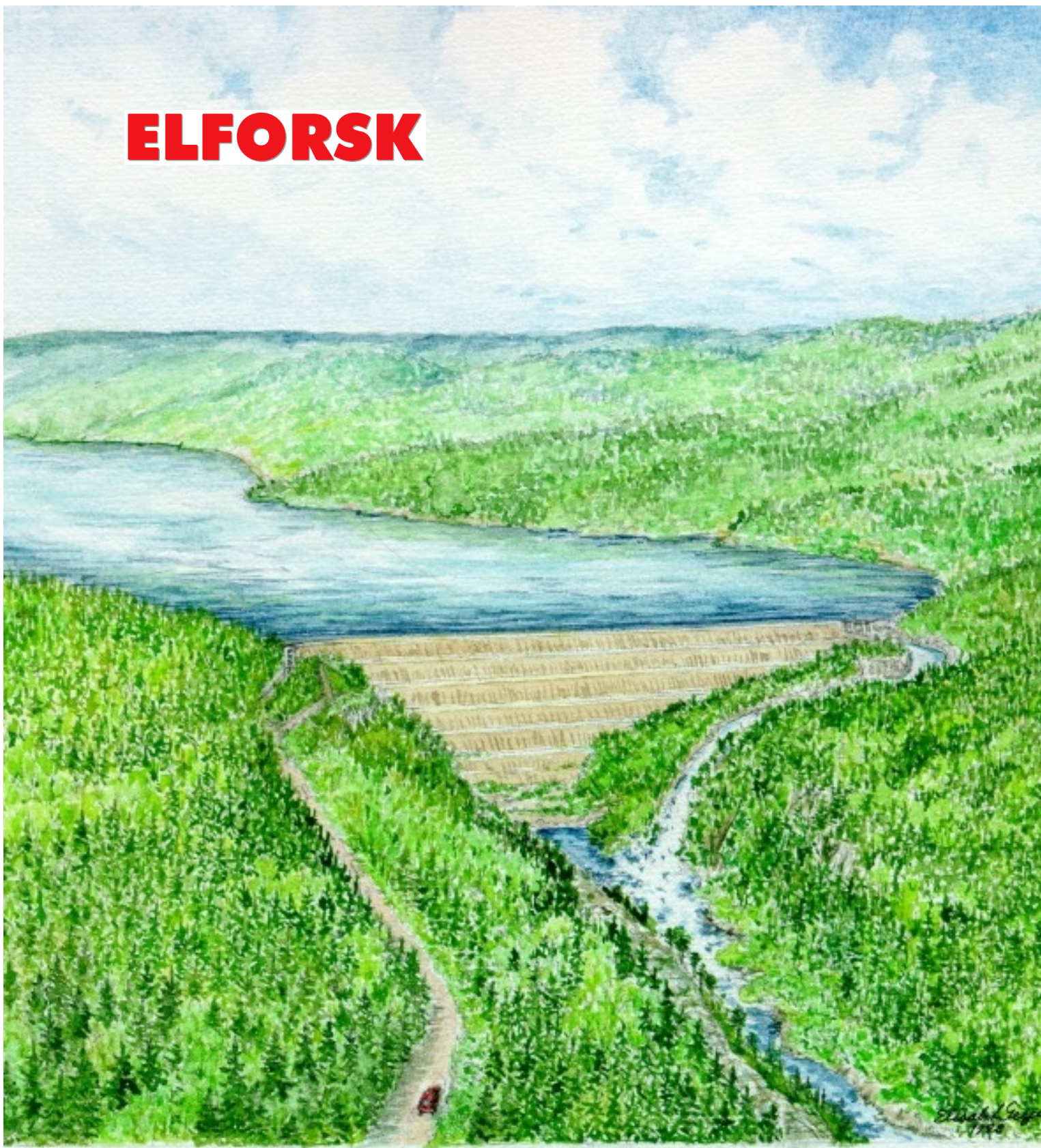


ELFORSK



DAMMSÄKERHET

Ny elektrodkonstruktion för långtidsmätning av självpotential

Rapport 01:19

Ny elektrodkonstruktion för långtidsmätning av självpotential

Elforsk rapport 01:19

Ny elektrodkonstruktion för långtidsmätning av självpotential

Elforsk rapport 01:19

**Hans Thunehed, Luleå Tekniska Högskola
Carl-Axel Triumph, GeoVista AB**

Förord

Föreliggande rapport beskriver resultaten från tester av långtidsstabila självpotentialelektroder för övervakning av vattenströmning genom jord- och stenfyllningsdammar. Projektet har finansierats av Elforsk AB.

Författarna vill tacka Roger Lindfors för hjälp med tillverkning av elektroder samt Andrew Berube för hjälp med fältarbete. Vi vill också tacka Vattenfall Vattenkraft AB för tillträde till dammen och pegelkuren vid Suorva samt för att vi fått ta del av vattenståndsdata.

Hans Thunehed

Carl-Axel Triumf

Sammanfattning

Självpotentialmätningar (SP) kan utföras i syfte att undersöka vattenströmning och eventuell inre erosion i jord- och stenfyllningsdammar. Mätningarna grundar sig på att en elektrisk potentialskillnad uppkommer mellan uppströms- och nedströmssidan av ett poröst medium när en elektrolyt som t.ex. vatten genomströmmar det. Tidigare har SP-mätningar på dammar gjorts vid enstaka tillfällen för att detektera inhomogeniteter, men med moderna datainsamlingssystem kan kontinuerlig övervakning ske. Ett sådant system installerades på östra Suorvadammen 1993 och det är fortfarande i drift. De elektroder som installerades i systemet visade sig tyvärr ge instabila värden efter några års användning.

Under sommaren 1998 installerades 14 nya elektroder på östra Suorvadammen. Det befintliga datainsamlingssystemet användes för mätningarna. Elektroderna var av tre olika typer nämligen blymetall-, Borin Stelth (Cu-CuSO_4) och en typ av Cu-CuSO_4 -elektroder som sattes samman in situ.

En analys av stabiliteten av elektroderna har gjorts för mätningar under en hel barmarkssäsong. Standardavvikelsen för skillnaden i dygnsmedelvärden mellan två Cu-CuSO_4 -elektroder i samma elektrodgröp var endast några få mV. När kortvågiga variationer filtrerats bort sjönk standardavvikelsen till 1 till 2 mV. Detta kan anses vara fullt tillfredsställande med tanke på andra störningskällor och storleken på de signaler som ska mätas.

Abstract

Measurements of spontaneous potential (SP) can be carried out in order to assess seepage conditions and possible internal erosion in embankment dams. The method is based on the fact that an electrical potential difference will arise between the upstream and downstream side of a porous medium when an electrolyte is flowing through it. Older SP work on dams has mainly been in the form of separate measurements but modern data collection systems has made continuous supervision feasible. Such a system was installed on the eastern Suorva dam in 1993 and it is still running. Unfortunately the electrodes used started to give unreliable values after a few years.

14 new electrodes were installed on the eastern Suorva dam during the summer 1998. The existing data collection system was used for measurements. Three different types of electrodes were used namely lead metal, Borin Stelth (Cu-CuSO₄) and Cu-CuSO₄-electrodes that were put together in situ.

An analysis of the stability of the electrodes has been conducted for one measurement season (app. June to October). The standard deviation for the difference of daily means between two electrodes in the same pit was only a few mV. After low-pass filtering this value was reduced to 1 to 2 mV. This is quite satisfactory considering other noise sources and the magnitude of the signals that are measured.

Innehållsförteckning

1	BAKGRUND	1
2	STRÖMNINGSPOTENTIAL	2
3	DAMMÖVERVAKNING MED SP.....	3
4	ELEKTRODER FÖR SP-MÄTNING.....	4
5	NYA ELEKTRODER PÅ ÖSTRA SUORVADAMMEN.....	5
6	RESULTAT	8
6.1	STABILITET.....	8
6.2	JÄMFÖRELSE MED ÄLDRE ELEKTRODER.....	12
6.3	SAMBAND MELLAN SP OCH YTTRE FAKTORER	14
6.4	UPPGRÄVNING OCH KONTROLL AV ÄLDRE ELEKTRODER	16
7	DISKUSSION OCH SLUTSATSER	18
7.1	TEMPERATUR.....	18
7.2	UTTORKNING.....	18
7.3	EROSION	18
7.4	REGN.....	19
7.5	JONDIFFUSION OCH STRÖM GENOM ELEKTRODEN.....	19
7.6	MÖJLIGHET TILL BYTE AV ELEKTRODER	19
7.7	TESTADE ELEKTRODERS FUNKTION.....	20
8	REFERENSER.....	21

1 Bakgrund

I Sverige finns ett stort antal höga dammar. Många av dessa byggdes under 50-, 60- och 70-talen för vattenkraftsproduktion och deras ålder i kombination med den potentiella risk för mänskliga liv och materiella skador som föreligger vid ett dammhaveri, har föranlett utveckling av metoder för övervakning av dammarnas status.

De flesta kraftverksdammarna i Sverige är uppbyggda kring en central kärna av morän med låg hydraulisk permeabilitet. Kärnan omges av ett filter bestående av sandigt material och ytterst finns ett stöd bestående av sprängsten. En möjlig orsak till ett haveri för en sådan damm är inre erosion. Finmaterial från kärnan förs bort i denna process varvid vattenflödet ökar. Om inte processen stoppas kan flödet så småningom bli okontrollerat och dammen havererar. Inre erosion kan upptäckas genom att vattenflödet genom dammen ökar och att detta vatten är grumligt av finpartiklar. Dessutom kan sättningar och sjunkhål förekomma. Det finns dock behov av metoder för att upptäcka anomalt flöde genom dammkärnan i ett tidigt skede samt att lokalisera vilket område i dammen som är drabbat.

Flera olika metoder har testats för övervakning av dammar från ytan eller i borrhål. Till dessa hör mätning med mark- eller borrhålsradar (t.ex. Andersson et al. 1992, Carlsten et al. 1995), temperaturmätningar (t.ex. Johansson 1997), resistivitmätning (t.ex. Johansson & Dahlin 1999) samt kombinerad mätning av självpotential och resistivitet (t.ex. Triumf et al. 1995, Triumf & Thunehed 1996). Vid självpotentialmätning registreras den elektriska potentialskillnad som uppkommer när en elektrolyt strömmar genom ett poröst medium som t.ex. ett jordmaterial (t.ex. Friborg 1996).

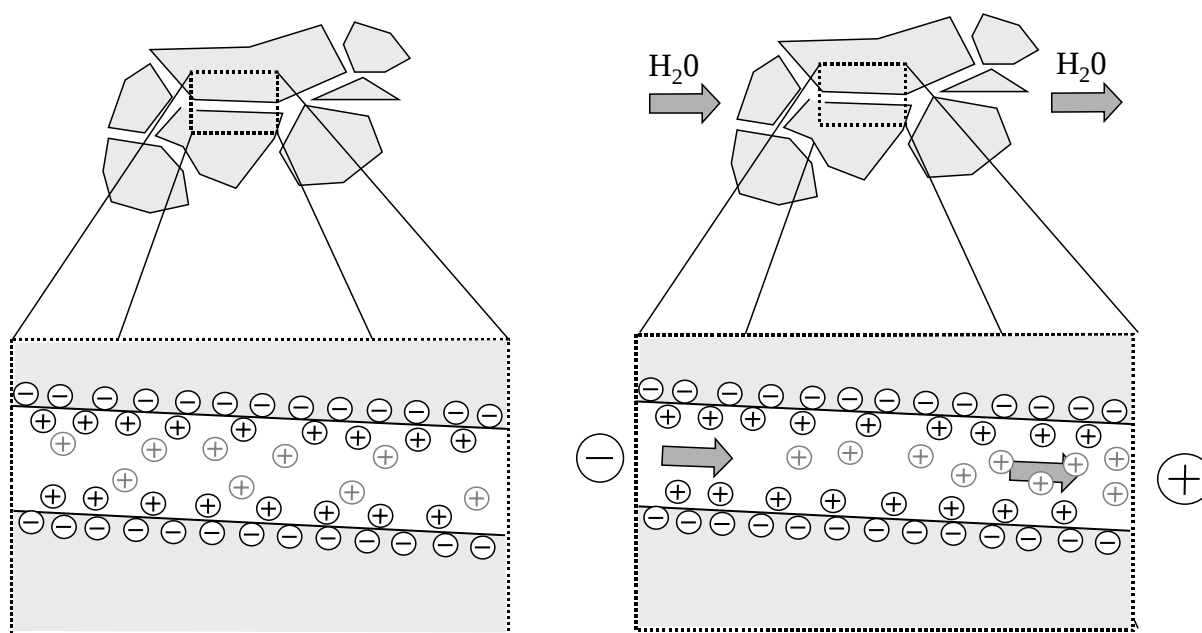
Ett mätsystem för kombinerad mätning av självpotential och resistivitet installerades på östra Suorvadammen 1993. Efter två säsongers mätningar kunde fyra områden med förhöjd strömningspotential identifieras (Triumf et al. 1995). De anomala potentialerna antogs bero på inhomogeniteter i dammen med därtill kopplad förhöjd vattenströmning som därmed skulle kunna vara potentiella riskområden för inre erosion. Mätningarna fortsatte efter testperioden för att se om strömningspotentialerna förändrades med tiden. Tyvärr visade det sig dock att de elektroder som valts för installationen började ge otillförlitliga värden efter några års mätningar. Några relativt snöfattiga vintrar i mitten på nittitalet medförde dessutom att fyllnadsgraden i Suorvamagasinet var låg och strömningspotentialerna var därför svaga under denna period.

Självpotentialmätningar har alltså visat sig ha hög potential för att detektera inre erosion i ett tidigt skede. Det har dock funnits ett behov av att utveckla långtidsstabila elektroder för att metoden ska vara användbar i produktionsmässig dammövervakning.

2 Strömningspotential

Strömningspotential är ett av flera fenomen som gemensamt kallas självpotentialer (SP). Gemensamt för dessa är att de är relaterade till elektriska strömmar som uppkommer spontant i naturen. Friborg (1996) har beskrivit de mekanismer som ger upphov till strömningspotential och där finns också en lista av originalreferenser. En kortfattad beskrivning av fenomenet ges dock nedan.

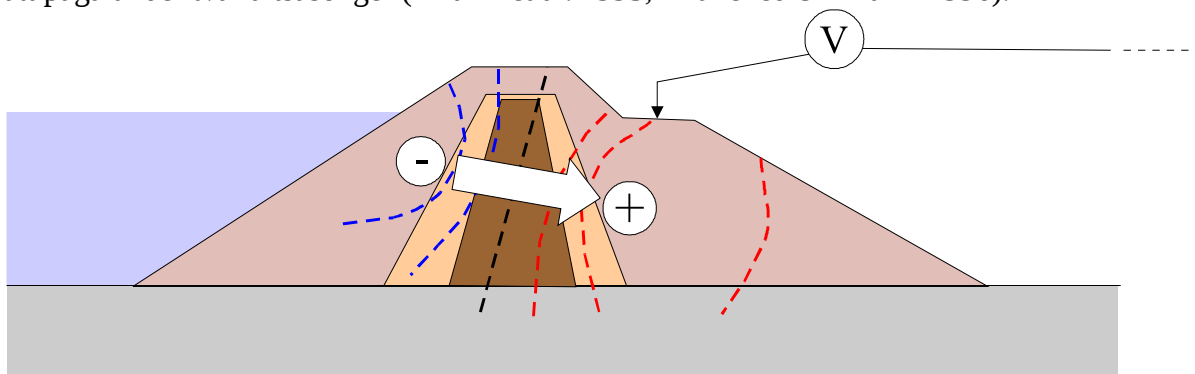
De flesta silikatmineral har en negativ elektrisk laddning på sin yta (Figur 1). Detta innebär att positiva laddningar i den elektrolyt som fyller omgivande porer attraheras till mineralkornens yta varvid ett elektriskt dubbellager bildas. De laddningar som befinner sig nära mineralkornen är hårt bundna och påverkas inte av rörelser i porvätskan. Däremot kommer den yttre delen av dubbellagret att skjuvas om en hydraulisk tryckgradient sätter porvätskan i rörelse. Detta resulterar i en obalans i laddning eftersom ett överskott på positivt laddade joner uppkommer i nerströmsdelen av poren (Figur 1). I en damm resulterar detta i en elektrisk potentialskillnad mellan uppströms- och nerströmssidan (Figur 2) som kan registreras med mätningar på dammens yta eller i borrhål.



Figur 1. Principen för uppkomst av strömningspotential (endast överskottsladdningar visas). I en vattenmättad jordmassa har mineralkornen normalt en negativ ytladdning. Detta attraherar positiva joner i porvätskan varvid ett elektriskt dubbellager uppstår. Om vattnet sätts i rörelse av en tryckgradient skjuvas detta dubbellager och en elektrisk potentialskillnad uppkommer mellan uppströms- och nerströmssidan.

3 Dammövervakning med SP

Strömningspotentialer uppkommer i en jord- eller stenfyllningsdamm även i frånvaro av inre erosion eller andra skador. Inhomogeniteter eller skador kan dock upptäckas som lokala avvikelser i potentialfältet. Kartläggning av dammar med självpotentialmätning har förekommit under lång tid (t.ex. Ogilvy et al. 1969, Butler & Llopis 1990). De publicerade artiklarna har i huvudsak visat på exempel där anomalt vattenflöde lokaliserats vid enstaka mätningar. Med modern datainsamlingsteknik kan metoden dock användas för kontinuerlig övervakning. En installation med 45 elektroder, baserat på ett ABEM Multimac-system, gjordes på östra Suorvadammen under sommaren 1993. Projektet finansierades av Elforsk AB och Norrbottens Forskningsråd och var planerat att pågå under två fältsäsonger (Triumf et al. 1995, Thunehed & Triumf 1996).



Figur 2. Principen för mätning av strömningspotential på en stenfyllningsdamm. Vattenströmningen genom dammens kärna ger upphov till en elektrisk potentialskillnad mellan uppströms- och nedströmssidan och därmed mellan olika punkter på dammens yta. Potentialen mäts relativt en punkt vid sidan om dammen. De streckade linjerna symboliserar ekvipotentiallinjer. Deras verkliga utseende beror av flera faktorer, bl.a. resistiviteten i olika delar av dammen.

Det bästa sättet att lokalisera inhomogeniteter i dammen visade sig vara att mäta upp hur självpotentialen förändrades under tidsperioder då vattennivån i magasinet steg eller sjönk. På så sätt kunde fyra områden med anomala egenskaper identifieras. Dessa områden sammanföll också med lokala förhöjningar i självpotential relativt en referens vid sidan av dammen. Självpotentialen påverkas emellertid också av markfuktighet, nederbörd och temperatur varför mätning av temporala differenser är att föredra. Eftersom resultaten var lovande fortsatte mätningarna på Suorvadammen efter projekttidens slut. Datainsamlingssystemet visade sig ha hög tillförlitlighet och med undantag för några korta avbrott orsakade av kabelbrott, datorhaverier mm. har mätningarna fortsatt och pågår fortfarande. Redan under fältsäsongen 1995 visade det sig att vissa av de elektroder som använts vid installationen inte gav tillförlitliga värden. I varje elektrodposition hade en reservelektrod placerats och skillnaden i potential mellan dessa och respektive ordinarie elektrod kunde vara flera tiotal mV.

4 Elektroder för SP-mätning

Om en metallektrod förs ned i en elektrolyt kommer elektrokemiska reaktioner att uppstå. Det innebär att en elektrisk potentialskillnad uppträder mellan elektroden och elektrolyten. Om elektroden via en voltmeter kopplas till en likadan elektrod som också förs ned i samma elektrolyt kommer potentialskillnaderna att balansera varandra och utslaget på voltmeteren blir noll.

I princip skulle det alltså vara möjligt att mäta självpotentialer i marken genom att föra ned metallektroder vid markytan. I praktiken är det dock inte möjligt eftersom det inte går att tillse att identiska förhållanden råder vid bägge elektroderna. Skillnader i temperatur, fuktighet och jonstyrka kommer att påverka polarisationen vid respektive elektrod och mätvärdet blir inte noll även vid avsaknad av verkliga självpotentialer.

Det är inte möjligt att göra elektroder som är fullständigt opolariserbara men polarisationen kan minimeras genom att kontakten mellan mätsystemet och marken sker i två steg (t.ex. Parasnis 1997). Metallektroden förs in i en mättad lösning av metallens eget salt. En koppelarelektrod kan t.ex. föras ned i en mättad CuSO_4 -lösning. Därefter bringas denna lösning i kontakt med markens elektrolyt via något poröst material som t.ex. trä eller en keram.

5 Nya elektroder på Östra Suorvadammen

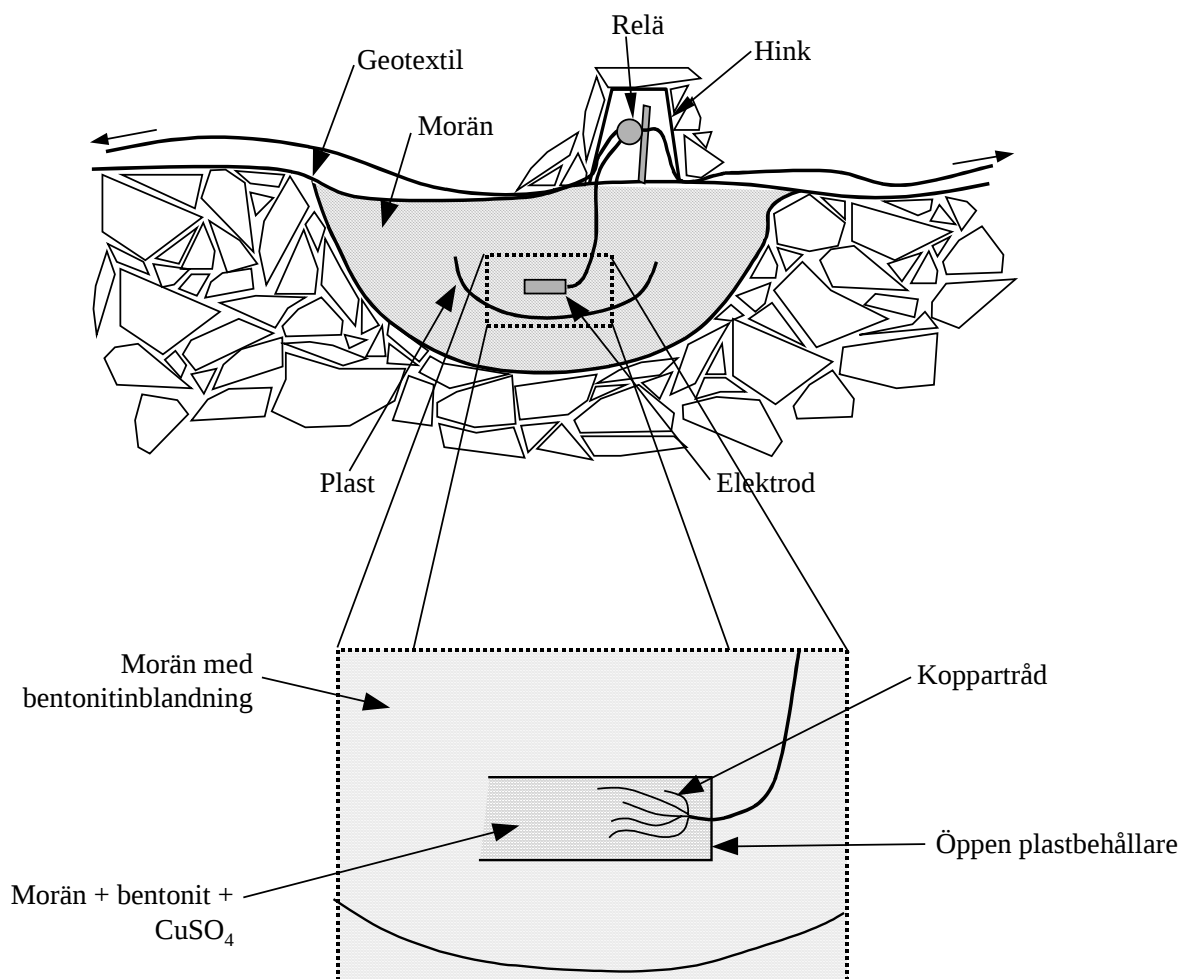
De elektroder som installerades på Suorvadammen 1993 var av Pb-PbCl₂-typ (Petiau & Dupis 1980). Blyelektroden är ingjuten i gips innehållande PbCl₂ och NaCl. Kontakten mot omgivningen sker via gipset. Elektrodtypen har låg brusnivå (Petiau & Dupis 1980) och hade tidigare långtidstestats utanför Luleå. De elektroder av denna typ som tillverkats vid Luleå Tekniska Universitet har uppvisat skillnader i potential på några få mV som nya och dessa små värden verkade inte påverkas efter testtiden. De yttre förhållande vid Suorva-dammen verkar dock ha påverkat elektrodernas funktion negativt. Innan detta projekt startade var det inte känt vad detta kan ha berott på. Det troligaste var att elektroderna förändrats på grund av t.ex. jondiffusion eller uttorkning av gipsmassan men det kunde inte uteslutas att erosion av finpartiklar i elektrodgroparna hade ökat kontaktresistansen till en för hög nivå.

En elektrodgrop grävdes därför upp för att undersöka förhållandena där. Resultatet av tester på dessa elektroder redovisas nedan.

Långtidsstabila SP-elektroder används för mätning av korrosionspotentialer och sådana elektroder finns kommersiellt tillgängliga. Problemet vissa av dessa är att de enligt specifikation inte ska utsättas för temperaturer under fryspunkten. Några elektroder av denna typ har dock placerats på Suorva-dammen för testmätning (Stelth, Borin Manufacturing, USA).

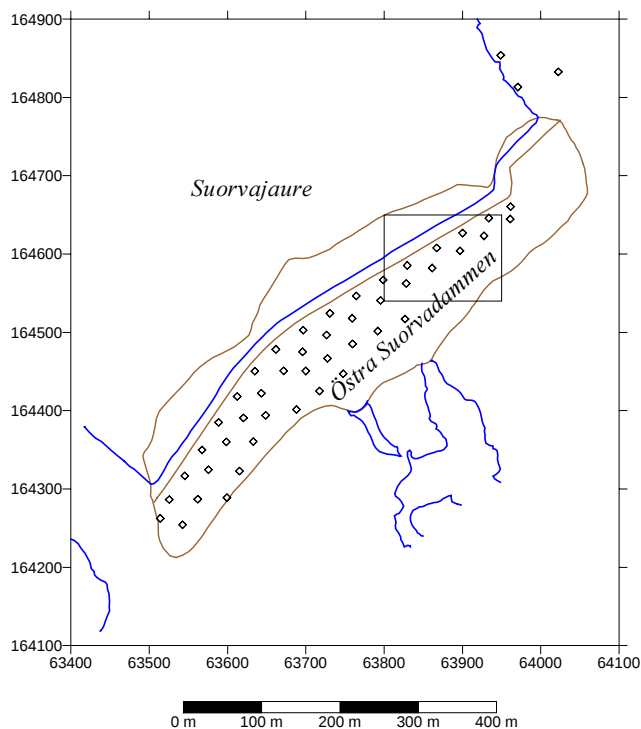
Flera olika krav måste kunna ställas på SP-elektroder som ska användas i dammövervakning. Givetvis måste de vara stabila men dessutom måste de vara relativt okänsliga för påverkan från klimatfaktorer som temperaturvariationer, torka och regn. Det är en också fördel om tillverkningskostnaden är låg. Kontaktytan mot omgivande dammaterial ska vara stor så att kontaktresistansen inte blir för stor och för att utjämna lokala ytnära SP-variationer.

En elektrodtyp som förmodades uppfylla dessa krav har installerats på sex platser på östra Suorvadammen. Det grova ytmaterialet på dammen är olämpligt för elektriska mätningar. Gropar som var ca. en meter djupa grävdes därför (Figur 3) och i botten av dessa placerades en geotextil vars uppgift var att förhindra erosion av finmaterial. Groparna fylldes sedan med ca. 20 cm morän. Därefter placerades plastfolie i skålförm i groparna. I skålarna och deras närhet fylldes morän med ett par procents bentonitinblandning. I denna morän placerades mindre plastbehållare som fylldes med morän med ca. 20 procent bentonit samt CuSO₄. Koppartrådar från kabel där isoleringen skalats av längst ut var instoppad i behållarna. Syftet med att blanda bentonit i moränen var att skapa en vattenhållande volym med låg elektrisk resistivitet runt elektroden. Dessutom får inte kopparsulfaten sköljas eller diffundera bort från koppartrådarna. Den övre delen av gropen fylldes med morän. I den följande texten kallas dessa elektroder för in situ-elektroder eftersom de sätts samman på plats.

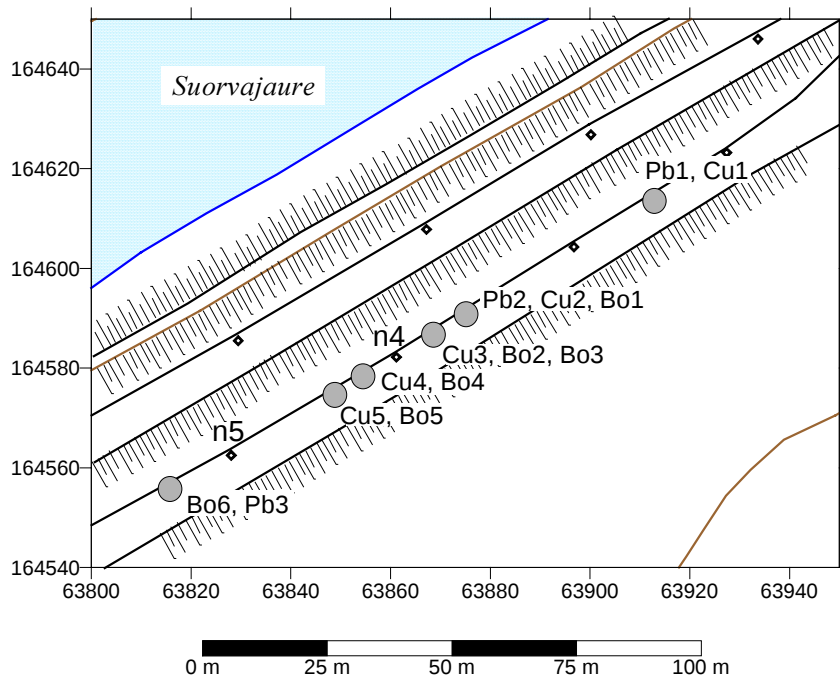


Figur 3. Konstruktion av in situ-elektrod. Elektroden består av en plastbehållare som fylls med morän, bentonit och kopparsulfat. I denna behållare är en kabel instucken där ca. 10 cm isolering skalats av. Elektroden är placerad i en moränfylld grop. Omgivande material består av grov sprängsten. Via ett relä på markytan är elektroden kopplad till datainsamlingssystemet. Upp till 32 sådana reläer med tillhörande elektroder kan placeras på en kabelslina.

Elektrodgroparnas placering på dammen framgår av Figur 4 och 5. Eftersom dammägaren eventuellt skulle utföra arbeten på dammkrönet under testperioden placerades groparna på den andra, nedre avsatsen på dammen. Elektrodena hamnade därmed på ett sådant avstånd från dammkärnan att strömningspotentialer förväntades bli svaga. Eftersom syftet med projektet var att utvärdera elektrodernas stabilitet var detta inget större problem. I groparna placerades in situ-elektroder, Borin-elektroder och några rena metallektroder (bly) enligt Figur 5.



Figur 4. Östra Suorvadammen med elektrodpositioner från installationen 1993 markerade. De tre elektroderna nordost om dammen är referenselektroder. De nya elektroderna placerades i området markerat med en rektangel.



Figur 5. Detaljkarta över det markerade området i Figur 4. Sex elektrodgröpar grävdes i området och 14 elektroder placerades i dessa. Cu1 till Cu5 är in situ-elektroder, Bo1 till Bo6 är Borin-elektroder (Stelth Cu-CuSO₄) medan Pb1 till Pb3 är blymetallelektroder. Elektrodena n4 och n5 är två elektroder från 1993 av Pb-PbCl₂-typ.

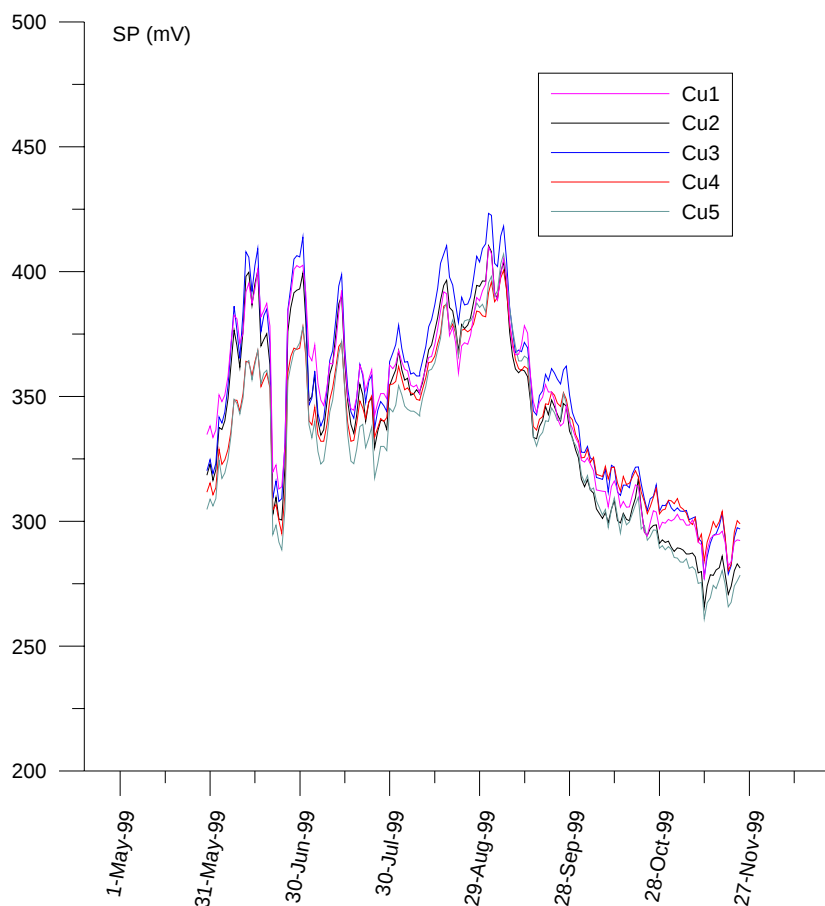
6 Resultat

I detta avsnitt redovisas resultaten av mätningarna i projektet. Mätningar har pågått från sommaren 1998 och pågår fortfarande men i diagrammen visas enbart data från sommaren och hösten 1999. Mätdata från vinterperioderna är av sämre kvalitet eftersom moränen runt elektroderna fryser.

6.1 Stabilitet

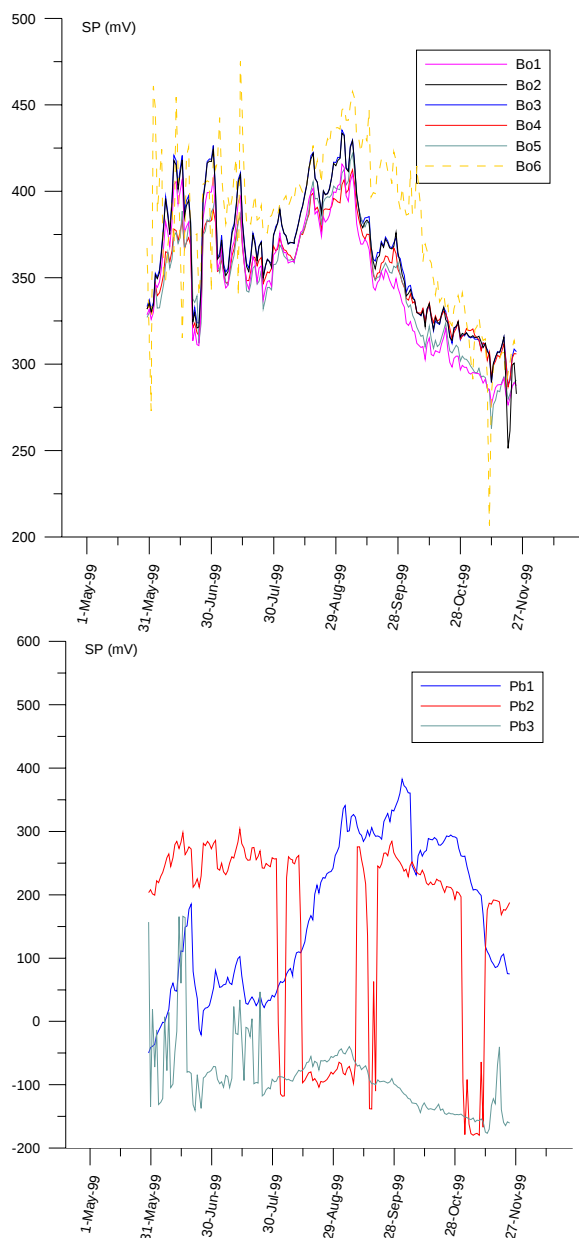
Störningar kan uppkomma på flera olika sätt i SP-mätningar. Störningar med en periodtid i intervallet ett dygn till en millisekund orsakas av solaktivitet, åskväder och kraftledning (50 Hz). Inverkan av dessa störningar hålls på en acceptabel nivå med hjälp av stackning och medelvärdesbildning samt med analoga filter i mätutrustningen. Mätning sker en gång i timmen och resultaten nedan baserar sig på dygnsmedelvärden. Med undantag för blyelektroden har standardavvikelsen för ett dygns mätningar legat i intervallet 1 till 10 mV. Det innebär att medelfelet för ett dygnsmedelvärde är någon enstaka mV.

Effekter av långsamma förändringar i elektrodernas funktion är i princip omöjliga att skilja från de verkliga självpotentialer som man vill mäta. I stället får elektrodernas stabilitet uppskattas genom att de jämförs med varandra. Två elektroder som placerats nära varandra på dammen bör ge ungefär samma mätvärden. Dessutom bör de reagera på vattennivåvariationer och climateffekter på ett systematiskt sätt. I detta projekt har dessutom mätningar gjorts på elektroder i samma grop. I ett sådant fall borde man få identiska mätvärden, men två olika elektroder brukar ofta ha en konstant skillnad i potential på någon eller några mV redan från tillverkningen. Elektroder baserade på koppar kommer dessutom att ha en konstant potentialskillnad mot blyelektroder på 463 mV (rumstemperatur) på grund av skillnaden i normalpotential. I Figur 6 visas uppmätt potential från de fem in situ-elektroden relativt en referenselektrod vid sidan av dammen. Potentialen uppvisar ganska stora variationer under mätperioden. En generell trend är att värdena stiger fram till i början av september för att sedan gradvis sjunka. Överlagrat på denna trend finns kortvågiga variationer som är relativt stora i början på sommaren. Resultaten för de olika elektroderna är emellertid mycket likartat både vad det gäller den generella trenden och de kortvågiga variationerna.



Figur 6. Uppmätt SP för de fem in situ-elektrodena.

Resultaten för elektroderna Bo1 till Bo6 och Pb1 till Pb3 kan ses i figur 7. De förstnämnda visar resultat som är mycket lika in situ-elektrodena med undantag för elektrod Bo6. Denna elektrod gav dåliga data redan från början vilket innebär att tillverkningsfel kan misstänkas. Det bör noteras att dessa data är registrerade efter det att elektroderna varit utsatta för nedfrysning under en vinter. Enligt specifikationen från tillverkaren får elektroderna inte utsättas för temperaturer under fryspunkten men det verkar alltså inte ha påverkat elektroderna. Resultaten med blyelektrodena blev inte bra. Elektroden Pb2 hoppar vid flera tillfällen mellan två nivåer motsvarande ungefär skillnaden i normalpotential mellan bly och koppar. Det är alltså möjligt att den silikontätning som gjordes vid anslutningen mellan elektroden och anslutningskabeln inte är tillräckligt tät. Endast elektrod Pb3 har gett periodvis bra data.

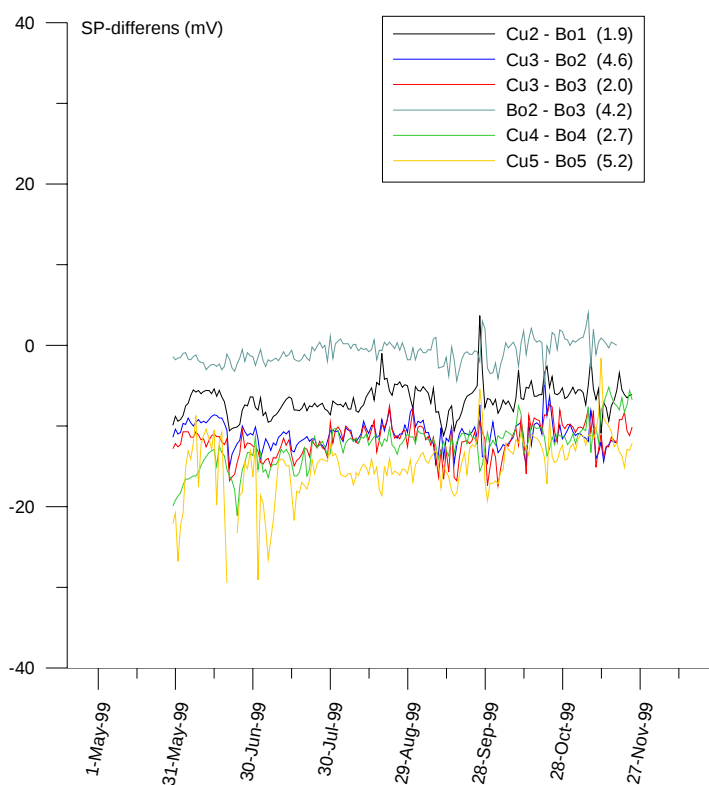


Figur 7. Uppmätt SP för Borin-elektroderna (vänster) och blyelektroderna (höger).

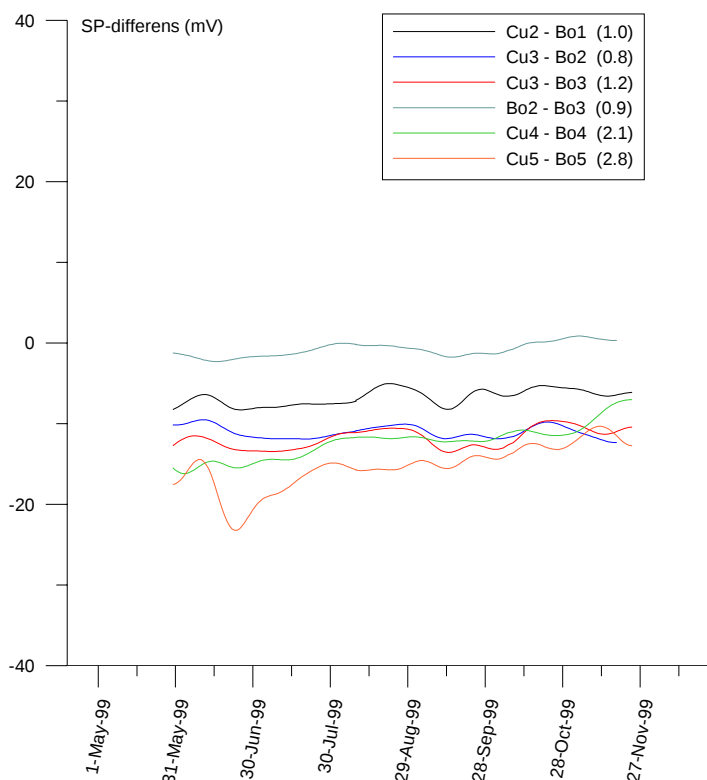
För att uppskatta stabiliteten på elektroder kan vi rita upp skillnaden i SP mellan två elektroder i samma elektrodgröp (Figur 8). Eftersom resultaten med blyelektroderna var så dåliga har inga jämförelser gjorts med dessa. I fem fall kan in situ-elektroder jämföras med Borin-elektroder och där verkar in situ-elektroder konsekvent ha en potential som är 10 till 15 mV lägre än Borin-elektroderna. Skillnaden beror förmodligen på en systematisk skillnad i elektrolytsammansättning som t.ex. kloridhalt. Förutom denna nivåskillnad är dock skillnaden i SP mellan elektroderna liten. Ingen drift kan konstateras och de kortvågiga variationer som finns är inte speciellt stora. Standardavvikelsen på SP-differensen är några få mV. Två Borin-elektroder har också

kunnat jämföras med resultat som liknar de ovan nämnda förutom att ingen nivåskillnad kan observeras här.

De kortvågiga variationerna kan filtreras bort. Flera metoder är tänkbara men konvolvering med ett filter (som t.ex. flytande medelvärde) ansågs vara olämpligt eftersom ett långt filter skulle vara nödvändigt. I stället transformerades data till frekvensdomän och filtreringen gjordes i form av ett ramp-format lågpasfilter. Dämpningen tilltar alltså linjärt från en låg startfrekvens till en hög slutfrekvens. Valet av dessa frekvenser är något subjektivt men slutfrekvensen bör väljas så att kortvågiga variationer orsakade av nederbörd etc. dämpas bort medan startfrekvensen bör väljas så att ändringar i SP orsakade av strömningspotential lämnas opåverkade. Efter ett antal försök valdes frekvenser motsvarande periodtiderna 128 dygn och 15 dygn som startfrekvens respektive slutfrekvens. I Figur 9 visas filtrerade data motsvarande de ofiltrerade i Figur 8. Förutom nivåskillnaderna mellan in situ- och Borinelektroder är skillnaderna mycket små. Standardavvikelsen är nu endast en till två mV.



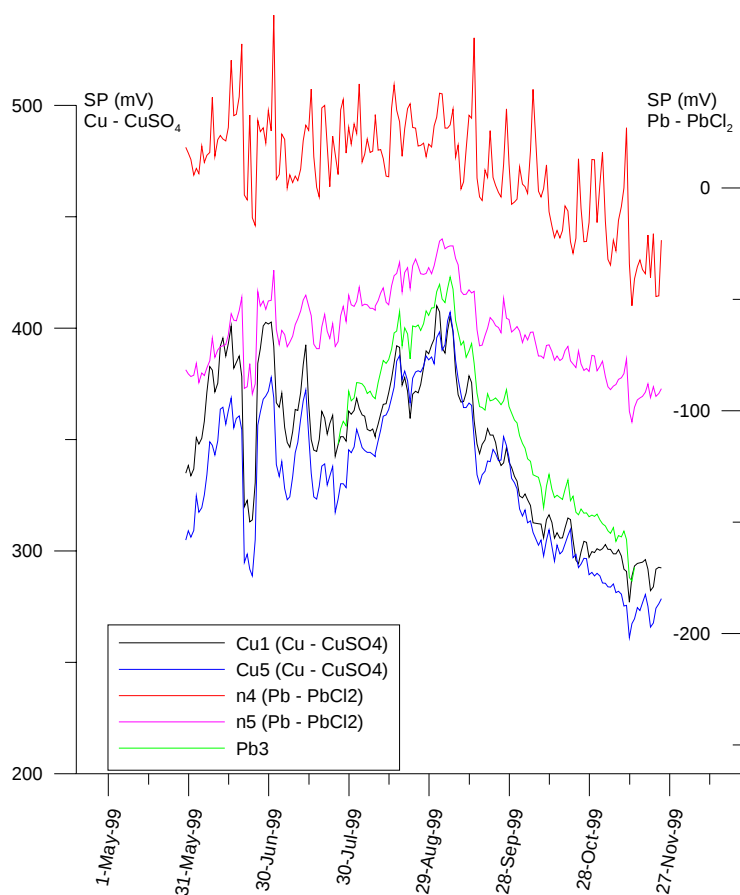
Figur 8. Skillnad i SP mellan elektroder parvis i samma gropar. Siffrorna inom parentes anger standardavvikelsen för respektive mätserie i mV.



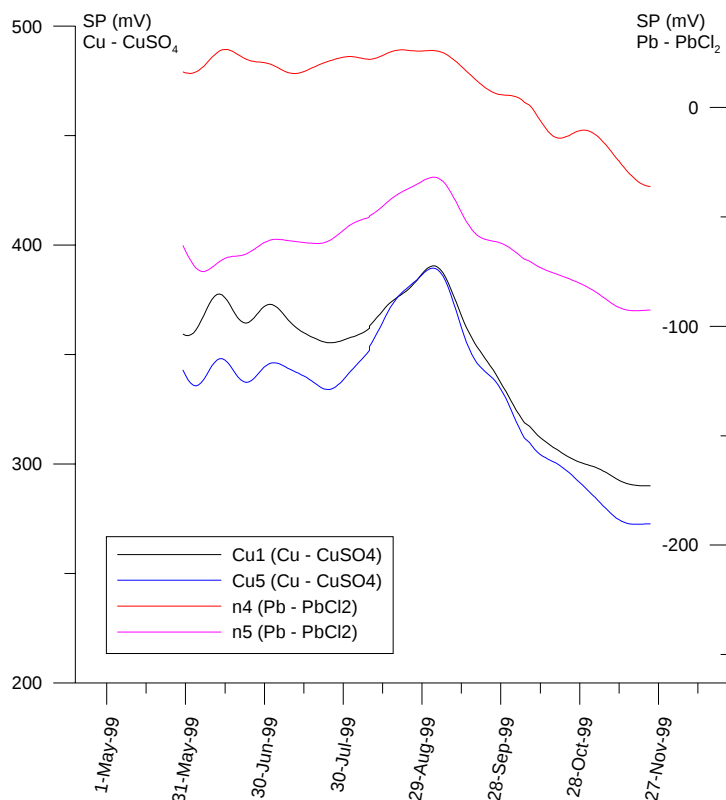
Figur 9. Lågpassfiltrerad skillnad mellan elektroder parvis i samma gropar. Siffrorna inom parentes anger standardavvikelsen för respektive mätserie i mV.

6.2 Jämförelse med äldre elektroder

En jämförelse har gjorts mellan två stycken in situ-elektroder och två gamla Pb-PbCl₂-elektroder från 1993 (Figur 10). Elektrodernas befinner sig nära varandra och deras positioner framgår av Figur 5. I Figur 10 har axlarna förskjutits på ett sådant sätt att det motsvarar skillnaden i normalpotential mellan bly och koppar. Båda Pb-PbCl₂-elektroderna har en potential som är kraftigt förskjuten i förhållande till in situ-elektroderna. Elektroden n4 ger dessutom väldigt brusiga data. De generella trenderna påminner dock om varandra även om den nedåtgående trenden under slutet av perioden är kraftigare för in situ-elektroderna än för Pb-PbCl₂-elektroderna. Denna skillnad kan dock inte bero på någon generell skillnad mellan elektrodtyperna eftersom en blyelektrod i en av de nya elektrodgroparna (Pb3) visar på samma tendens. Likheten i trender blir ännu tydligare om data lågpassfiltreras enligt den metod som beskrivs ovan (Figur 11).



Figur 10. Jämförelse mellan SP för två in situ-elektroder, en blyelektrod och två gamla Pb-PbCl₂-elektroder från 1993. Skalan för blyelektroderna har förskjutits för att motsvara skillnaden i normalpotential mellan koppar och bly.

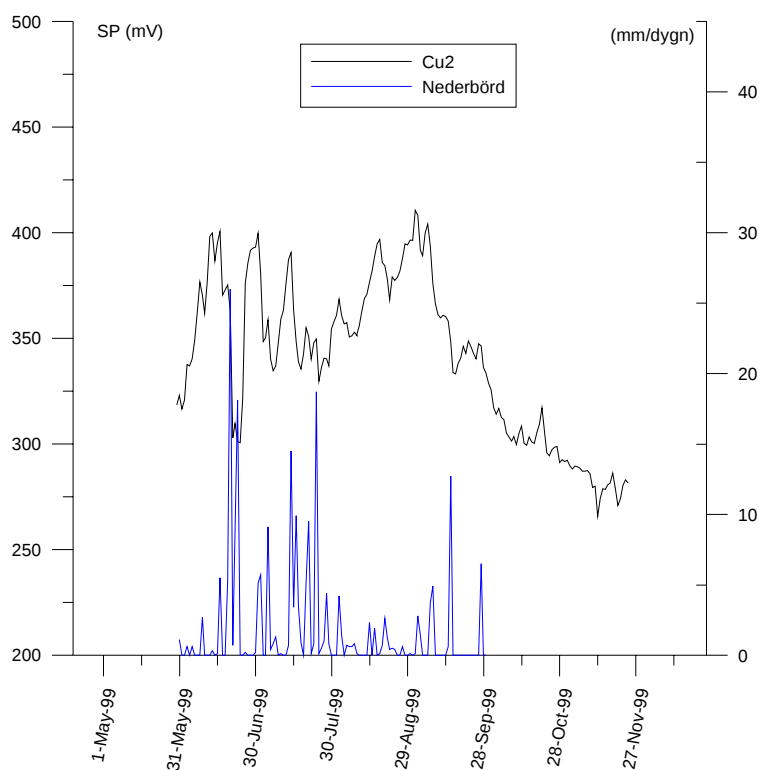


Figur 11. Jämförelse mellan SP för två in situ-elektroder och två gamla Pb-PbCl₂-elektroder från 1993. Skalan för blyelektroderna har förskjutits för att motsvara skillnaden i normalpotential mellan koppar och bly. Mätserierna är lågpasfilterade.

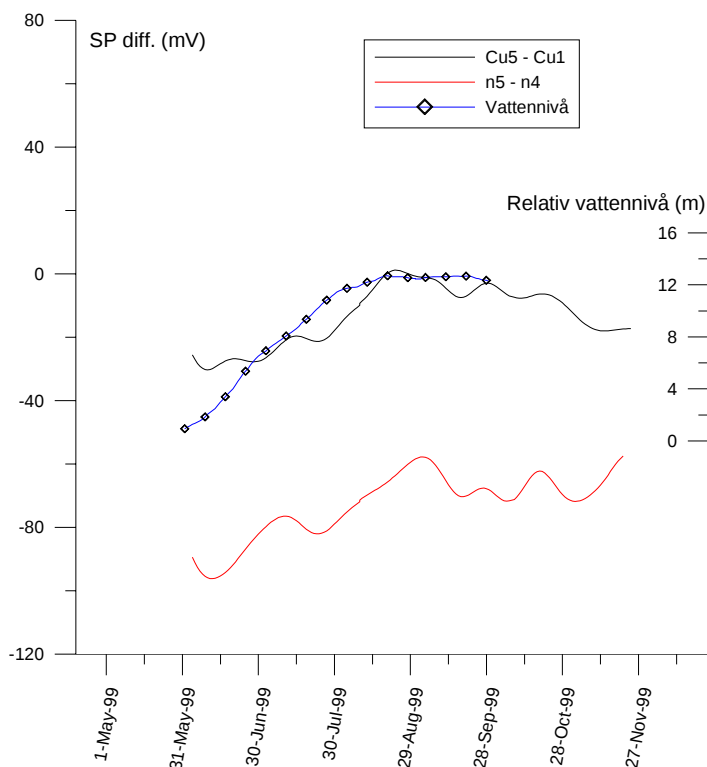
6.3 Samband mellan SP och yttre faktorer

Självpotentialen i en punkt på dammen är inte konstant utan varierar beroende på temperatur, vattennivå (strömning genom kärnan), strömning av ytvatten från regn och snösmältning samt kapillär strömning vid torrt väder. I figur 12 visas sambandet mellan SP och nederbörd. Nederbördsdata kommer från SMHI:s station vid Stora Sjöfallet vilken är belägen några kilometer från dammen men man kan anta att inga stora skillnader i nederbördsmängder förekommer mellan platserna. I diagrammet visas endast nederbördsdata från perioden juni t.o.m. september då nästan all nederbörd kan förutsättas ha kommit i form av regn. Det finns ett tydligt samband mellan nederbörd och sänkning av SP. Detta syns tydligt under t.ex. den nederbördsrika perioden 17/6 till 24/6. Under perioder av torrt väder stiger SP igen. Variationerna verkar vara större under sommarmånaderna än under hösten vilket förmodligen har sin förklaring i att markens ytskikt torkar ut snabbare under sommaren vid torrt väder. Det är alltså troligt att en viss konsekvent förskjutning av SP mot högre värden fås under sommaren och detta får inte förväxlas med strömningspotentialer orsakade av högt vattenstånd. Eftersom alla elektroder reagerar på ungefär samma sätt vid regn (se t.ex. Figur 6) så kan man komma tillrätta med detta problem genom att studera differenser i SP. I Figur 13 har differensen mellan två in situ- respektive två gamla elektroder ritats upp. Ett klart

samband finns mellan SP-differenserna och vattenståndet vilket indikerar att elektroderna Cu5 och n5 påverkats mer av det ökade vattentrycket. Sambandet är inte linjärt men det är heller inte att vänta.



Figur 12. Samband mellan SP och regn. Nederbördsdata avser dygnsvärden från SMHI:s station i Stora Sjöfallet.



Figur 13. Lågpassfilterad SP-differens mellan två in situ-elektroder respektive två Pb-PbCl₂-elektroder (jfr Figur 11) och vattenstånd i magasinet (relativ skala).

6.4 Uppgrävning och kontroll av äldre elektroder

I ett försök att fastställa orsaken till problemen med nivåförändringarna på Pb-PbCl₂-elektrodena grävdes en elektrodgrop upp. I varje grop från 1993 finns två elektroder och potentialskillnaden mellan ordinarie elektrod och reservelektrod var 60 mV innan gropen grävdes upp. Inget tecken på erosion av finmaterial kunde observeras när elektrodena frilades. Inga sprickor, missfärgningar eller andra synliga skador fanns på elektrodena. Potentialskillnaden mellan elektrodena var också densamma när de sattes intill varandra med endast ett tunt skikt av jord emellan. Elektrodena placerades sedan i vatten och potentialskillnaden mättes upp under några dagar utan att några påtagliga förändringar kunde observeras. Elektrodena fick sedan torka ordentligt och plastskyddet runt elektrodens överdel skars bort. Två blybitar trycktes sedan fast på varje elektrods utsida. Elektrodena sänktes sedan ner till hälften i vatten med blybitarna ovanför vattenytan. Skillnaden i potential mellan elektrodena var till att börja med 141 mV men efter ungefär en vecka i vattnet var potentialskillnaden nere i ungefär samma nivå (56 mV) som innan elektrodena grävdes upp. Potentialen mellan blyet i elektrodens mitt och de blybitar som anbringats på utsidan av gipset mättes upp till 84 respektive 15 mV för de två elektrodena (efter en vecka i vatten). Skillnaden i potential mellan de två blybitarna på samma elektrod var 16 respektive 7 mV. De stora skillnaderna indikerar att koncentrationsgradienter orsakade av jondiffusion uppstått i elektrodena. Dessa gradienter ger sedan upphov till koncentrationspotentialer. Vad som från början orsakat denna diffusion är dock oklart. Upprepad uttorkning och frysning

kan ha varit ett problem men det är också möjligt att elektroderna polariserats av att ström flutit genom dem.

7 Diskussion och slutsatser

För att det ska vara möjligt att detektera strömningspotentialer på ytan av en damm måste det vara möjligt att mäta SP med en noggrannhet bättre än ca. 10 mV. Felaktigheter i nivå kan kompenseras för genom att temporala differenser beräknas och kortvågiga variationer kan filtreras bort. Däremot måste elektrodriften vara liten eftersom den kan ha samma periodtid (> 1 månad) som den strömningspotential som man vill registrera. Drift i elektrodens potential kan uppkomma om de elektrokemiska förhållandena i elektroden störs genom att elektrolytens sammansättning förändras. Nedan följer en lista på faktorer som kan påverka elektroden och vad som kan göras för att minska denna påverkan.

7.1 Temperatur

Alla elektrokemiska normalpotentialer är temperaturberoende. Eftersom det i praktiken är omöjligt att undvika temperaturvariationer runt elektroden kommer alltså elektrodernas potential att förändras med t.ex. årstid. I de flesta fall kommer dock motsvarande temperaturvariation att ske vid referenselektroden varför effekten kancelleras. Likartad elektrodinstallation bör dock göras för referenselektroden som för mätelektrodena. I princip är det möjligt att utföra mätningar även när marken är frusen. I praktiken blir dock mätningarna av sämre kvalitet eftersom kontaktresistansen vid elektroden kan bli mycket hög. Dessutom blir mätningarna svårtolkade eftersom frysning orsakar stora resistivitetsförändringar i marken. För att undvika alltför snabba temperaturvariationer bör inte elektroderna placeras nära markytan. Extra isolering med markisoleringsskivor har visat sig ha mycket liten effekt. Eftersom frysning är mer eller mindre oundviklig måste elektroden tåla detta. Detta medför att vätske- eller gelfyllda elektroder kan vara olämpliga.

7.2 Uttorkning

Stödfyllningen på en damm kan vara mycket grov och därmed väl-dränerad. Det är inte lämpligt att mäta SP direkt i en sådan omgivning. Dels blir kontaktresistansen mot elektroden mycket stor och dessutom kan mycket lokala SP-variationer uppstå orsakade av variationer i fukthalt. Det är alltså nödvändigt att placera elektroden i något fuktighetshållande material som t.ex. morän. Likväl är det möjligt att elektroden i samband med perioder av varmt och torrt väder kan utsättas för torka. Det är då viktigt att elektrodens elektrolyt inte dräneras eller ändrar sammansättning vid sådana tillfällen. Vätskefyllda elektroder är olämpliga av denna orsak. Metallelektroder kommer också att påverkas och dessa är alltså endast användbara i mycket stabila miljöer. De in situ-elektroder som använts i detta projekt är skyddade från uttorkning dels genom att elektroden är placerad i en trågformad plastbehållare och dels genom att bentonit tillsatts i den omgivande moränen.

7.3 Erosion

Moränen i en elektrodgröp utsätts för erosion i samband med regn och snösmältning eftersom den omgivande stödfyllningen är så grov. Den elektrodgröp som grävdes upp i detta projekt visade inga synliga tecken på erosion men risken finns att det så

småningom skulle kunna uppstå kaviteter vid elektroden. In situ-elektroden är skyddade mot erosion genom att en geotextil placerats i gropens botten. Textilens uppgift är att släppa igenom överskottsvatten men inte finmaterial.

7.4 Regn

Regn orsakar en sänkning av SP. Detta är ett oundvikligt fenomen på en damm och en källa till brus. Fenomenet har ingenting med elektroden i sig att göra och kan förmodligen inte undvikas helt. Det är dock rimligt att anta att påverkan är mindre om elektroden placeras på ett större djup under markytan. Av praktiska och ekonomiska skäl kan dock inte elektrodgroparna göras hur djupa som helst. Att fenomenet inte är relaterat till regnvatteninfiltration i själva elektrodgropen visas av att varken täckning (markisolering, 1993) eller tätande material (bentonit, 1998) eliminerat problemet.

7.5 Jondiffusion och ström genom elektroden

Elektrodens potential ändras om elektrolytens sammansättning störs. Detta kan ske genom att joner diffunderar till/från elektroden. Drivkraften till diffusionen kan vara koncentrationsgradienter eller att en ström drivs genom elektroden. I det förra fallet så gäller det alltså att tillse att elektrolytsammansättningen är stabil åtminstone i elektrodens centrala delar. Detta kan åstadkommas genom en barriär bestående av trä, keram eller gips. I in situ-elektroden består barriären av en inblandning av bentonit i moränen runt elektroden. Bentoniten sänker den hydrauliska konduktiviteten i moränen. Volymen med elektrodelektrolyt kan dessutom göras relativt stor. Det tar en viss tid för bentoniten att absorbera vatten och innan dess ger inte elektroden stabila resultat. Vid installationen på Suorva-dammen tog detta dock bara några dagar i anspråk.

Ström ska vid normalt bruk inte gå genom elektroden annat än mycket små mängder under mätning. Dessa svaga strömmar ska inte polarisera elektroden om inte kontakresistansen är mycket stor som t.ex. vid frysta eller torra förhållanden. Ström kan dock oavsiktligt drivas genom elektroden vid t.ex. kabelbrott eller fel på kopplingsreläer genom att elektroden kopplas till en punkt med avvikande potential. För en väl fungerande elektrod ska dock potentialen återgå till ursprungliga värden när strömmen bryts, men detta kan ta lång tid. Motivet till att använda metallelektroder för SP-mätning är att dessa också skulle kunna fungera som strömelektroder. Resultaten med blyelektroder i detta projekt var emellertid inte bra och dessutom måste alltså tillräcklig tid flyta från det att ström sänts ut till dess potential mäts för att elektroden ska kunna återhämta sig.

7.6 Möjlighet till byte av elektroder

Oavsett vilken typ av elektrod som används måste man räkna med att den förr eller senare kan behöva bytas ut. Livslängden för Borin Stelth-elektroder är dock angiven till minst 20 år av tillverkaren så det ska inte behöva ske så ofta. Elektroden bör dock kunna grävas upp relativt lätt och därför bör återfyllning av grov sprängsten i eller på groparna undvikas.

7.7 Testade elektroders funktion

I detta projekt har två olika elektrodtyper baserade på Cu-CuSO₄ testats. Bägge typerna har fungerat tillfredställande under hela testperioden. En viss konstant skillnad i elektrodernas potential har konstaterats men denna är egentligen inte något problem eftersom analysen av data till stor del baserar sig på temporala differenser eller variationer relaterade till vattennivån i magasinet. Skillnaden är dessutom relativt liten och uppgår som mest till ca. 15 mV.

Elektrodernas stabilitet måste vara sådan att driften är liten i förhållande till den strömningspotential som man vill mäta upp. På östra Suorva-dammen har variationer i strömningspotential orsakad av vattennivåförändringar på nästan 200 mV noterats. Givetvis finns det ingen undre gräns för hur stabila man skulle önska att elektroderna kunde vara. Det är dock rimligt att anta att det är mycket svårt att kunna mäta SP med en noggrannhet bättre än någon mV. I de fall där elektroder placerats i samma elektrodgrop har skillnaden i mätvärde haft en standardavvikelse på 2 till 5 mV. När kortvågiga variationer filtrerats bort har dessa värden minskat till 1 till 2 mV. Elektrodernas stabilitet är alltså helt tillfredställande.

Elektrodernas funktion är beroende av stabiliteten i den omgivande miljön. Stödfyllningen i en damm kan vara mycket grov med mycket stora kontraster i elektrisk resistivitet mellan å ena sidan stenblock och hålrum och å andra sidan fickor av fuktighetshållande material. Dessa kontraster ger upphov till lokala ytnära SP-variationer som förmodligen kan vara ganska stora. För att ett uppmätt SP-värde ska vara representativt måste alltså en lågresistiv volym skapas som har tillräckligt stor kontaktyta mot den omgivande stödfyllningen för att utjämna dessa lokala anomalier. I denna volym, som utgörs av morän med bentonitinblandning, placeras den egentliga elektroden. Moränvolymen bidrar också till att utjämna fuktighets- och temperaturvariationer.

Någon större skillnad i datakvalité kan inte konstateras mellan Borin Stelth-elektroder och egentillverkade in situ-elektroder. Eftersom de förra inte ska utsättas för temperaturer under fryspunkten enligt tillverkaren är dock slutsatsen att in situ-elektroder är lämpligare för installation på svenska dammar. In situ-elektroderna är dessutom betydligt billigare.

8 Referenser

- [1] Andersson P., Cederström M., Gustafsson E., Nilsson Å., Wörman A., 1992. Undersökning av dammar med radar och utspädningssond. Kungliga Tekniska Högskolan, Stockholm. Report no. 58.
- [2] Butler D.K., Llopis J.L., 1990. Assessment of anomalous seepage conditions. In: Geotechnical and Environmental Geophysics. Ed.: S.H. Ward. Society of Exploration Geophysicists.
- [3] Carlsten S., Johansson S., Wörman A., 1995. Radar techniques for indicating internal erosion in embankment dams. *Journal of Applied Geophysics*. 33, 143-156.
- [4] Friberg J., 1996. Experimental and theoretical investigations into the streaming potential phenomenon with special reference to applications in glaciated terrain. Ph.D. thesis. Luleå University of Technology. 1997:2.
- [5] Johansson S., 1997. Seepage monitoring in embankment dams. Royal Institute of Technology. Ph.D. Thesis.
- [6] Johansson S., Dahlin T., 1999. Övervakning av läckage i fyllningsdammarna genom resistivitetsmätning. Elfork rapport 99:8.
- [7] Ogilvy A.A., Ayed M.A., Bogoslovsky V.A., 1969. Geophysical studies of water leakages from reservoirs. *Geophysical Prospecting*, 17, 36-62.
- [8] Parasnis D.S., 1997. Principles of Applied Geophysics. 5th edition. Chapman & Hall.
- [9] Petiau G., Dupis A., 1980. Noise, temperature coefficient, and long-time stability of electrodes for telluric observations. *Geophysical Prospecting*. 28, 792-804.
- [10] Triumf C-A., Thunehed H., Enström A., 1995: Övervakning av tät kärnans funktion genom mätning av självpotential och resistivitet. VASO dammkommittés rapport nr 23.
- [11] Triumf C-A., Thunehed H., 1996: Two years of self potential measurements on a large dam in northern Sweden. Repari and Upgrading of dams. Proceedings. Royal Institute of Technology, Stockholm.

ELFORSK

SVENSKA ELFÖRETAGENS FORSKNINGS- OCH UTVECKLINGS – ELFORSK – AB

Elforsk AB, 101 53 Stockholm. Besöksadress: Olof Palmes Gata 31

Telefon: 08-677 25 30. Telefax 08-677 25 35

www.elforsk.se