

Rapport

R19:1970

Inst. för Byggnadsstatik

**Erfarenheter från
avvattningsförsök med
elektroosmos i några
svenska leror**

TEKNISKA HOGSKOLAN I LUND
SEKTIONEN FÖR VÄG- OCH VATTEN
BIBLIOTEKET

Sven Hansbo

Byggforskningen

Erfarenheter från avvattningsförsök med elektroosmos i några svenska leror

Sven Hansbo

Medan elektroosmosmetoden sedan länge tillämpats utomlands för att avvattna och stabilisera finkorniga jordar har den i Sverige så vitt det är känt endast använts vid tre tillfällen, varav två som led i gjorda utredningar.

Fältförsök i Skå-Edeby

Första gången elektroosmosmetoden prövades var i samband med utredningen om en blivande storflygplats i Skå-Edeby, 1957—58. Härvid gjordes fältförsök med anoder av i ena fallet 25 mm armeringsjärn, i andra fallet 75 mm järnrör. Anoderna placerades i hörnpunkterna av en regelbunden sexhörning med i förstnämnda fallet 2,2 m sida, i sistnämnda fallet

3 m sida omkring en centralt placerad katod, utformad som en filterbrunn vilken läns pumpades under försöksperioderna. Anoderna drevs ned till 6 m djup i jorden. Försök utfördes också med enstaka anoder av varierande diameter för att undersöka betydelsen av strömtätheten vid anodytan. Den elektriska spänningen över försöksfältet varierade i stort sett från ca 70 till 150 V, strömstyrkan från ca 40 till 120 A.

Den undersökta jordarten består av lera med ursprungliga geotekniska egenskaper enligt sammanställning 1.

Fältförsöken i Skå-Edeby och resultaten därav har redovisats av Fredén i en specialrapport från Statens väginstitut (Fredén 1962).

Bygghorsningen Sammanfattningar

R19:1970

Medan elektroosmosmetoden sedan länge tillämpats utomlands för att avvattna och stabilisera finkorniga jordar har den i Sverige så vitt det är känt endast använts vid tre tillfällen, varav två som led i gjorda utredningar. Det gäller fältförsöken i Skå-Edeby, vid Scania Vabis i Södertälje och Östra sjukhuset i Göteborg.

Sammanställning:

1. Skå-Edeby

Odränerad skjuvhållfasthet	τ_f	0,6—1,7 N/cm ²
Sensitivitet	S_t	10—15
Naturlig vattenhalt	w	68—85 %
Finlekstal	w_F	52—83 %
Elektroosmotisk permeabilitetskoeff.	k_e	(ej best. på lab.)
Resistivitet i jord	ρ	(ej best. på lab.)
Rel. kompression	ε_2	10—15 %
Konsolideringskoeff.	c_v	$\geq 0,4 \cdot 10^{-4}$ cm ² /s

2. Scania Vabis

Odränerad skjuvhållfasthet	τ_f	1,5—2 N/cm ²
Sensitivitet	S_t	5—20
Naturlig vattenhalt	w	40—70 %
Finlekstal	w_F	30—65 %
Salthalt hos porvattnet		2,9—3,7 g/l
Elektroosmotisk permeabilitetskoeff.	k_e	$0,3 \cdot 10^{-4}$ — $2,2 \cdot 10^{-4}$ cm ² /sV
Resistivitet i jord	ρ	510—630 Ω cm
Rel. kompression	ε_2	5—10 %
Konsolideringskoeff.	c_v	$\geq 0,5 \cdot 10^{-4}$ cm ² /s

3. Östra sjukhuset

Odränerad skjuvhållfasthet	τ_f	1—5 N/cm ²
Sensitivitet	S_t	10—200
Naturlig vattenhalt	w	20—80 %
Finlekstal	w_F	30—60 %
Elektroosmotisk permeabilitetskoeff.	k_e	$0—0,8 \cdot 10^{-4}$ cm ² /sV
Resistivitet i jord	ρ	560—3 130 Ω cm
Rel. kompression	ε_2	7—15 %
Konsolideringskoeff.	c_v	$\geq 10^{-4}$ cm ² /s

UDK 624.138.5

Sammanfattning av:

Hansbo, S, 1970, Erfarenheter från avvattningsförsök med elektroosmos i några svenska leror. (Statens institut för byggnadsforskning) Stockholm. Rapport R19:1970. 72 s., ill. 15 kr.

Distribution: Svensk Byggtjänst,
Box 1403, 111 84 Stockholm.
Tel. 08-24 28 60.

Abonnemangsgrupp: k (konstruktion).



FIG. 1. Elektroosmotisk avvattning av lera under 6—7 m sandfyllning vid Scania Vabis, Södertälje. Elektrodena av järnvägsräler är förbundna i längs- och tvärlinje med armeringsjärn. Anoderna och förbindelsejärnen mellan anoderna är plastisolerade.

Fältförsök vid Scania Vabis, Södertälje

Elektroosmotisk avvattning prövades nästa gång åren 1965—66 för att konsolidera ett maximalt 4 m tjockt lerlager under den blivande chassiverkstaden för Scania Vabis i Södertälje. Anläggningen, vilken dimensionerades av Norges geotekniska institut (NGI) i samarbete med ingenjörfirman Jacobson & Widmark AB, föreslogs bli utförd med 36 anoder och 22 katoder.

Med ledning av erfarenheterna från Ås i Norge (Bjerrum *et al.*, 1967) beslöts att katoderna skulle utformas på samma sätt som anoderna, dvs. inte som i fallet Skå-Edeby (och som i normala fall) såsom filterbrunnar. För att kunna slå elektrodena genom en ovanpå lerlagret utlagd sand- och grusfyllning om ca 6—7 m mäktighet valdes till såväl anoder som katoder järnvägsräler med vikten 25 kg/m. Anoderna och katoderna skulle placeras växelvis i rader med tre anoder i varje anodrad och två katoder i varje katodrad, FIG. 1. Genom en felkoppling kom emellertid de avsedda anoderna att tjänstgöra som katoder och vice versa. Avstånden mellan elektrodena i varje rad valdes till 5 m och avståndet mellan elektrodraderna till 6 m. Den elektriska spänningen över fältet varierade i stort sett från 70 till 90 V, strömstyrkan från ca 1 100 till 1 800 A.

Den avvattnade leran som innehöll rikligt med mo- och mjälaskikt hade ursprungliga geotekniska egenskaper enligt sammanställning 2.

Fältförsök vid Östra sjukhuset, Göteborg

Det tredje och sista avvattningsförsöket med elektroosmos utfördes som ett led i utredningen om det blivande Östra sjukhuset i Göteborg, 1966—67. Avsikten med försöken var att vid mera renodlade förhållanden än i fallet Scania Vabis, Södertälje, undersöka möjligheterna till avvattning när katoderna inte utformats som filterbrunnar från vilka läns-pumpning utförs. Försöken syftade dessutom till att undersöka inverkan av elektrod-diametern. Med nämnda mål i sikte utfördes tre i princip likadana fältförsök med i ena fallet elektroder av 25 mm (1") armeringsjärn, i andra fallet 38 mm (1 1/2") järnrör och i tredje fallet 63 mm (2 1/2") järnrör. Varje försöksfält utformades med tre anodraderna om vardera sex anoder och två mellanliggande katodraderna om vardera fem katoder, FIG. 2. Elektrodavstånden var genomgående 2 m. Elektrodena blev på detta sätt placerade i knutpunkterna till ett nät av liksidiga trianglar, vilket ansågs ge bästa möjliga effektivitet. Elektrodena trycktes ned i jorden till en längd av ca 10 m. I början av försöket var de tre försöksfälten parallellkopplade, och den elektriska spänningen över varje delfält varierade då från ca 7 till 9 V, strömstyrkan från ca 18 till 30 A. I slutet av försöksserien kopplades strömmen över endast ett försöksfält åt gången, varvid spänningen över fältet i fråga varierade från ca 25 till 40 V, strömstyrkan från ca 80 till 120 A.

Den undersökta leran hade ursprungliga geotekniska egenskaper enligt sammanställning 3.

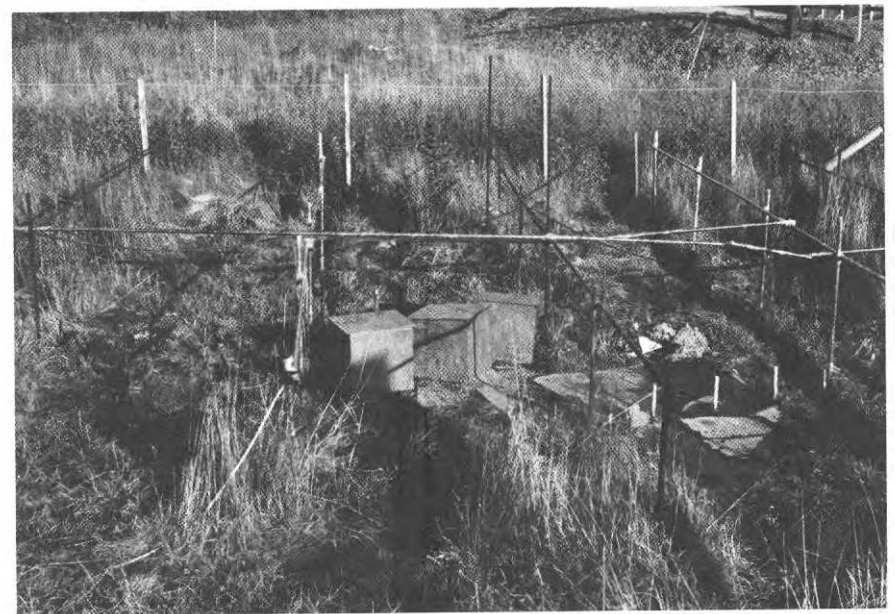


FIG. 2. Elektroosmotisk avvattning av lera vid Östra sjukhuset i Göteborg. Bilden visar försöksfält 1 med elektroder och förbindningar av 25 mm armeringsjärn. Tack vare den låga elektriska spänningen över fälten krävdes ingen isolering, men katoderna och förbindelsejärnen mellan katoderna lindades ändå i detta försöksfält med isolerband av plast. Lådorna på bilden innehåller manometrar till porttrycksmätarna.

De mycket låga värden på k_e som uppmättes på vissa prover ($k_e \rightarrow 0$) synes bero på att de innehöll rikligt med snäckskal och att elströmmen av denna anledning gav upphov till stark gasutveckling.

Kompression av leran

Sättningen av markytan i Skå-Edeby uppmättes enligt Fredén till ca 15 cm efter en förbrukad elmängd av $0,42 \cdot 10^9$ C (eller en förbrukad energi av 9,67 MWh). Sättningen motsvarar en kompression per elmängdsenhet av $0,032 \text{ cm}^3/\text{C}$. Tyvärr har inte någon laboratoriebestämning av lerans elektroosmotiska egenskaper utförts.

Den erhållna sättningen, vilken motsvarar en bortpumpad vattenmängd av $13,5 \text{ m}^3$, stämmer relativt väl överens med uppmätta förändringar i lerans vattenhalt och någon nämnvärd gasbildning i jorden torde därför inte ha förekommit under försöket.

Sättningen av markytan vid Scania Vabis, Södertälje, har uppmätts till i medeltal 6 cm efter en förbrukad elmängd av $28 \cdot 10^9$ C, motsvarande en förbrukad energi av 830 MWh, FIG. 3. Den markanta ökningen i energiåtgång per cm sättning som inträffat vid ca 400 MWh torde bero på att anoderna då i stor utsträckning förbrukats och att övergångsresistansen mellan anoder och jord därmed blivit mycket stor. En del av elströmmen har utan tvivel passerat genom den sandfyllning på leran som är belägen ovan grundvattenytan och genom den sand som underlagrar leran. En grov uppskattning av den elmängd som passerat genom själva lerlagret ger vid handen att kompressionen per el-

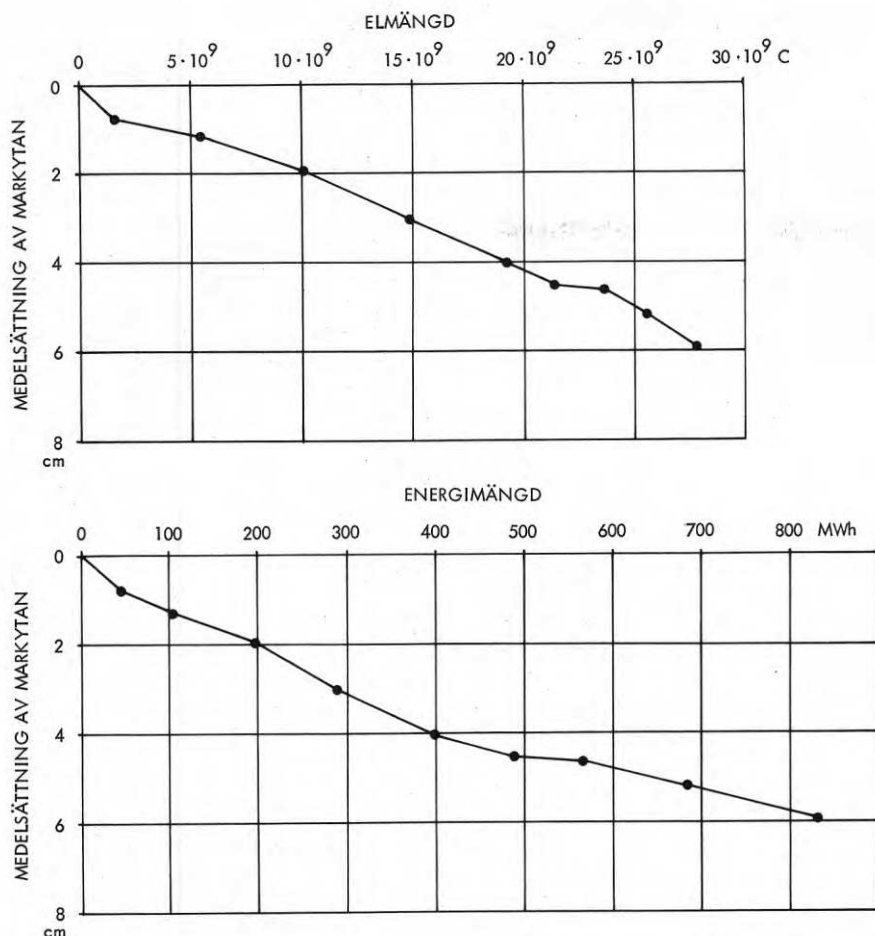


FIG. 3. Märkyttans medelsättning som funktion av tillförd elmängd och elektrisk energi; i senare fallet inklusive energiförluster i likströmsomformaren. Energiförbrukningen per cm sättning har som synes ökat markant efter ca 400 MWh.

mängdsenhet är ca 0,005 à 0,006 cm^3/C . Detta värde är avsevärt lägre än de på laboratorium uppmätta värdena (produkten $k_e \rho$) som är av storleksordningen 0,02 cm^3/C . En tänkbar orsak till den stora skillnaden mellan fält- och laboratorieresultat kan vara att man erhållit en mot den elektrosmotiska vattentransporten motriktad hydraulisk vattentransport, förorsakad av höga porvattentryck vid katoderna och låga porvattentryck vid anoderna. Den hydrauliska strömningen underlättas i detta fall genom förekomsten av horisontella mo- och sandskikt i leran och mjålan. De erhållna sättningsarna stämmer väl överens med uppmätta förändringar i vattenhalt, och gas torde därför inte ha bildats i någon nämnvärd omfattning.

Vid Östra sjukhuset i Göteborg har medelsättningen på 5 m djup med undantag för försöksfält 1 med 1"-elektroder uppmätts till ca 12 cm efter en förbrukad elmängd av $0,8 \cdot 10^9 \text{ C}$, FIG. 4. Avvikelsen för fält 1 synes emellertid helt kunna förklaras med att en allt större del av elströmmen på grund av den tilltagande anodförbrukningen tagit vägen genom lerlagrets övre delar, ovan de betraktade sättningsmätarna. Mätningarna visar som väntat att den erforderliga energin per cm sättning minskar med ökande elektroddiameter, FIG. 5.

Den rikliga förekomsten av snäckskal i lerlagrets övre delar (ner till ca 5 à 6 m djup) har vid Östra sjukhuset medfört en så kraftig gasutveckling under elbehandlingen, att man där i stället för kompression erhållit en svällning. Sättningen på 0,5 m djup är alltså mindre än på 5 m djup. Resultatet som bekräftats genom laboratorieförsök visar att gasutvecklingen ibland kan bli dominerande och att hänsyn till detta måste tas vid beräkning av lerans kompression genom elektroosmos. Produkten $k_e \rho$ bör därför i beräkningsformlerna bytas ut mot transporterad vattenmängd ($=k_e \rho$) minus bildad gasmängd per elmängdsenhet, FIG. 6. Bestämningen på laboratorium bör utföras vid samma effektiva överlagringstryck som i jorden där provet en gång togs.

Av FIG. 4 och det avvattnade områdets storlek finner man att volymminskningen av leran under 5 m djup blir 0,007 à 0,008 cm^3/C när de tre fälten var parallellkopplade och 0,014 à 0,015 cm^3/C när endast ett fält åt gången var inkopplat. Den erhållna skillnaden synes bero på att de genom elektroosmosen bildade porvattenövertrycken vid katoderna och porvattenundertrycken vid anoderna ger upphov till en hydraulisk strömning i riktning katod—anod, alltså motriktad den elektrosmotiska vatten-

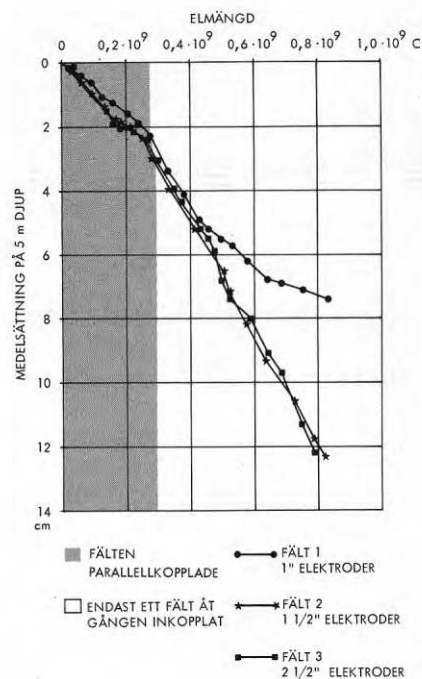


FIG. 4. Medelsättning på 5 m djup som funktion av tillförd elmängd. I fält 1 med 1" elektroder har som framgår en markant effektminskning inträffat efter $0,43 \cdot 10^9 \text{ C}$.

transporten. En analys baserad på portrycksmätningarna visar att denna hydrauliska strömning inte kan försummas och att dess inverkan var störst då fälten var parallellkopplade. Korrigeras de här nämnda värdena med hänsyn till den hydrauliska strömningen, får man en kompression per elmängdsenhet av 0,016 à 0,017 cm^3/C när fälten var parallellkopplade och 0,015 à 0,017 cm^3/C när endast ett fält åt gången var inkopplat, alltså ungefär samma värden. Effekten i försöksfälten är som framgår av FIG. 6 avsevärt sämre än på laboratorium, där värdena 0,040 à 0,045 cm^3/C erhållits. Någon beräkning av svällningen av det övre, 5 m tjocka lerlagret med utgångspunkt från laborievärdena låter sig inte göras, då den gasmängd som frigörs ur jorden genom sprickor e.d. är okänd.

Inverkan på några av lerans geotekniska egenskaper

Skjuvhållfastheten τ_f har genomgående ökat kraftigt intill anoderna, medan däremot en minskning i skjuvhållfastheten i regel kunnat konstateras intill katoderna där dessa inte utformats som filterbrunnar vilka läns-pumpats. Hållfasthetstillväxten i Skå-Edeby där sådan pumpning företogs

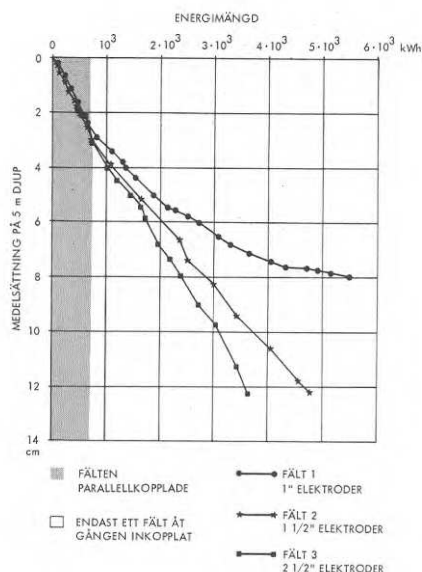


FIG. 5. Medelsättning på 5 m djup som funktion av tillförd elektrisk energi, exklusive energiförluster i likströmsomformaren. I fält 1 har som framgår energiförbrukningen per cm sättning ökat markant vid 2,1 MWh.

blev följaktligen mera jämnt fördelad och genomsnittligt högre än i övriga fall (50 % genomsnittlig ökning efter en förbrukad elmängd av $0,4 \cdot 10^9$ C, motsvarande energiförbrukningen 9,67 MWh).

Sensitiviteten S_t hos leran har i försöken vid Scania Vabis och Östra sjukhuset genomgående ökat intill katoderna, ibland mycket starkt. I ett av försöksfälten vid Östra sjukhuset ökade medelsensitiviteten inom hela elektroosmosfältet. Resultatet har alltså här blivit diametralt motsatt det av NGI i Ås erhållna.

Finlekstalet w_F minskade vid katoderna, sannolikt till följd av elektrofores. Denna minskning är sannolikt förklaringen till den konstaterade ökningen i sensitivitet.

Förkonsolideringstrycket i leran synes ha ökat intill anoderna, medan dess påverkan i övrigt är mera oklar. I fallet Skå-Edeby har förkonsolideringstrycket inte undersökts, men det är med ledning av övriga resultat därifrån troligt att man erhållit större och jämnare ökning än i övriga fall.

Forskningsbehov

I de fall när katoderna inte utformades som filterbrunnar erhöles som här framgår oväntade effekter på

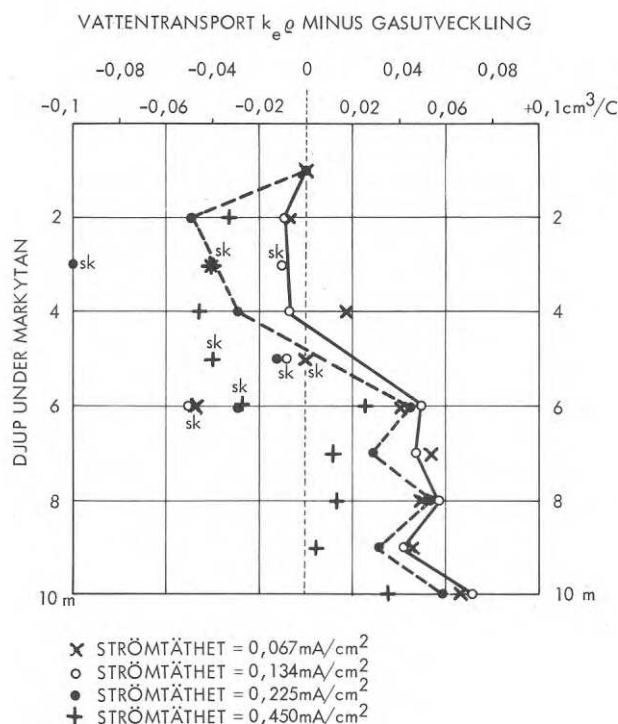


FIG. 6. Vattentransport minus gasutveckling, uppmätt i elektroodometer på prover tagna ca 60 m nordväst om försöksfälten. Bestämningen har utförts med varierande elströmtäthet, vald med hänsyn till förhållandena i fält. Den streckade och heldragna kurvan torde i stort sett representera fältförhållandena när endast ett fält var inkopplat. Under försöket har provet utsatts för samma effektiva överlagringstryck som i naturligt tillstånd.

speciellt skjuvhållfästhet och sensitivitet liksom en oväntat liten höjning av förkonsolideringstrycket. Det vore därför ytterst önskvärt att klargöra betydelsen av katodens utformning och kanske speciellt betydelsen av pumpning. Fortsatta studier av elektroosmos bör följaktligen främst omfatta jämförelser mellan intilliggande fält där man i ena fallet utformar katoderna som filterbrunnar vilka läns-pumpas och i andra fallet använder likadana katoder och anoder.

Dimensioneringssynpunkter

På basis av mätningarna i Skå-Edeby rekommenderar Fredén att *strömtätheten i anodytan* inte bör överstiga 2 à 3 mA/cm² för att det från början erhållna spänningsfallet skall bli stationärt. De utförda mätningarna vid Östra sjukhuset i Göteborg visar emellertid att problemet är mer komplicerat än man kanske kunde tro med ledning av Skå-Edeby-försöken. Man finner bl.a. att spänningsfallet i jorden mellan elektroderna ständigt är utsatt för variationer. Med de strömstyrkor som använts (ursprunglig strömtäthet < 1 mA/cm² vid Östra sjukhuset och ca 5 mA/cm² vid Scania Vabis) har emellertid tillståndet i systemet som helhet — intill dess

anodförbrukningen börjat göra sig gällande — kunnat betraktas som i stort sett stationärt.

För dimensioneringen är det nödvändigt att man med utgångspunkt från resistiviteten i jord ρ , bestämd på laboratorium, i förhand kan beräkna *förhållandet mellan spänning och strömstyrka* för det elektroosmossystem som valts. Undersökningarna vid Scania Vabis och Östra sjukhuset visar i detta avseende god överensstämmelse mellan verklighet och teori. Resultaten tyder på att det fel som begås när jordresistansen försummas vid sidan av övergångsresistansen mellan elektroder och jord saknar praktisk betydelse.

Anodförbrukningen, vilken kan beräknas ur Faradays lag, är en viktig faktor som inte får glömmas bort vid dimensioneringen.

Undersökningarna visar att *upphettningen av elektroderna* (Joules lag) kan bli avsevärd, både när det gäller anoder och katoder, och att den möjligen kan ge upphov till termiska strömningar i porvattnet som inte kan försummas. Anodupphettningen ökar dessutom allteftersom anoderna förbrukas och kan leda till uttorkning av jorden närmast intill så att övergångsresistansen anod—jord blir mycket stor.

Findings from dewatering tests with electro-osmosis in some Swedish clays

Sven Hansbo

National Swedish Building Research Summaries

R19:1970

Although electro-osmosis has been used frequently in the field of soil mechanics since the beginning of the 1940's, it has been practised in Sweden on only three occasions (as far as is known to the author), two of which formed integral parts of more comprehensive investigations.

Field test at Skå-Edeby

Electro-osmosis was first tried in connection with an investigation concerning an international airport at Skå-Edeby in 1957—58. Field tests were made using anodes of 1 in. reinforcement bars, in one case, and 3 in. iron tubes, in the other. The anodes were placed at the corner points of a regular hexagon with 2.2 m side in the first case and 3.0 m

side in the second around a central cathode formed as a filter well which was constantly pumped dry during the test periods. The anodes were driven into the soil to a depth of 6 m.

Tests were also made with single anodes of varying diameters in order to investigate the importance of the current density through the anode surface.

The applied potential varied from about 70 to 150 V and the current from about 40 to 120 A.

The soil investigated consists of clay with the original geotechnical data, given in list 1.

The field tests at Skå-Edeby and the results obtained have been reported in detail by Fredén (1962).

Although electro-osmosis has been used frequently in the field of soil mechanics since the beginning of the 1940's, it has been practised in Sweden on only three occasions (as far as is known to the author), two of which formed integral parts of more comprehensive investigations. Field tests were carried out at Skå-Edeby, Scania Vabis, Södertälje and Östra sjukhuset, Gothenburg.

List:

1. Skå-Edeby

Undrained shear strength	τ_f	0.6—1.7 N/cm ²
Sensitivity	S_t	10—15
Natural water content	w	68—85 %
Fineness number (\approx liquid limit)	w_F	52—83 %
Electro-osmotic permeability	k_e	(not determined in the laboratory)
Soil resistivity	ρ	(not determined in the laboratory)
Relative compression $\left(\varepsilon_2 = \frac{\lg 2 \cdot C_c}{1 + e_0} \right)$	ε_2	10—15 %
Coefficient of consolidation	c_v	$\geq 0.4 \cdot 10^{-4}$ cm ² /sec

2. Scania Vabis

Undrained shear strength	τ_f	1.5—2 N/cm ²
Sensitivity	S_t	5—20
Natural water content	w	40—70 %
Fineness number (\approx liquid limit)	w_F	30—65 %
Salt concentration in pore water, equivalent NaCl		2.9—3.7 g/l
Electro-osmotic permeability	k_e	$0.3 \cdot 10^{-4}$ — $2.2 \cdot 10^{-4}$ cm ² /secV
Soil resistivity	ρ	510—630 Ω cm
Relative compression	ε_2	5—10 %
Coefficient of consolidation	c_v	$\geq 0.5 \cdot 10^{-4}$ cm ² /sec

3. Östra sjukhuset

Undrained shear strength	τ_f	1—5 N/cm ²
Sensitivity	S_t	10—200
Natural water content	w	20—80 %
Fineness number (\approx liquid limit)	w_F	30—60 %
Electro-osmotic permeability	k_e	0 — $0.8 \cdot 10^{-4}$ cm ² /secV
Soil resistivity	ρ	560—3130 Ω cm
Relative compression	ε_2	7—15 %
Coefficient of consolidation	c_v	$\geq 10^{-4}$ cm ² /sec

UDC 624.138.5

Summary of:

Hansbo, S, 1970, Erfarenheter från avvattningsförsök med elektroosmos i några svenska leror. /Findings from dewatering tests with electro-osmosis in some Swedish clays./ (Statens institut för byggnadsforskning) Stockholm. Rapport R19: 1970. 72 p., ill. 15 Sw. kr.

Distribution: Svensk Byggtjänst, Box 1403, S-111 84 Stockholm, Sweden.



FIG. 1. *Electro-osmotic stabilization of clay layer covered by 6—7 m thick sand fill at Scania Vabis, Södertälje. The electrodes of iron rails are mutually connected by reinforcing bars. The anodes and the reinforcing bars which connect the anodes are insulated with a plastic cover.*

Field test at Scania Vabis, Södertälje

Electro-osmosis was next used in 1965—66 for the purpose of consolidating a maximum 4 m thick clay layer underneath the planned chassis workshop of Scania Vabis, Södertälje. The installation was dimensioned and planned by the Norwegian Geotechnical Institute in cooperation with Jacobson & Widmark AB, to cover a total area of 2000 m² and to contain a total of 36 anodes and 22 cathodes.

With the guidance of the findings made at Ås in Norway (Bjerrum *et al.*, 1967) it was decided that the cathodes equal to the anodes should be chosen, i.e. not designed as filter wells as in the case of Skå-Edeby (and in the normal case). To make it possible to drive the electrodes through a 6—7 m thick sand and gravel fill, previously placed upon the clay layer, iron rails with the weight of 25 kg/m were chosen. The anodes and cathodes were placed in 12 anode rows and 11 cathode rows by turns with 3 anodes in each anode row and 2 cathodes in each cathode row as shown in FIG. 1. However, what were planned as anodes became cathodes and vice versa owing to a mistake in coupling. The distance between the electrodes in each row was fixed at 5 m and the distance between the rows at 6 m. The applied potential varied from about 70 to 90 V and the current from about 1100 to 1800 A.

The clay layer which contained several seams of fine sand and silt has the original geotechnical data, given in list 2.

Field test at Östra sjukhuset, Gothenburg

Finally, tests on electro-osmotic stabilization were also carried out as part of an investigation concerning a planned hospital in Gothenburg, Östra sjukhuset, in 1966—67. The purpose of the tests was to investigate under more homogeneous soil conditions than in the previous case of Scania Vabis, Södertälje, the effect of electro-osmosis when the cathodes are not formed as filter wells with a pumping device. Another purpose of the tests was to investigate the influence of electrode diameter. Therefore, similar installations of electrodes were made in three different test fields. In the first test field electrodes of 1 in. reinforcing bars were used, in the second test field 1 1/2 in. iron tubes and in the third test field 2 1/2 in. iron tubes.

The test fields contained three anode rows with six anodes in each row and two cathode rows with five cathodes in each row, FIG. 2. The electrodes were placed at a distance of 2 m at the corner points of equilateral triangles which was supposed to give the best possible efficiency. They were pushed approximately 10 m into the soil. To start with, the three test fields were connected in parallel; the potential applied to each field then varied from about 7 to 9 V and the current from about 18 to 30 A. Later, current was applied to only one field at a time. In this case the applied potential varied from about 25 to 40 V and the current from about 80 to 120 A.

The clay investigated has the original geotechnical data, given in list 3.

The extremely low values of k_e measured in some samples ($k_e \rightarrow 0$) seem to

be caused by a great quantity of shells in the clay. Thus, under the influence of electric current these shells seemed to generate gas which reduced or prevented water flow.

Compression of the clay

The settlement of the ground surface at Skå-Edeby was measured by Fredén to about 15 cm at a consumed current of $0.42 \cdot 10^9$ C (or a consumed energy of 9.67 MWh). This corresponds to a volume of expelled water per consumed current unit of 0.032 cm³/C. Unfortunately, the electro-osmotic data of the clay were not determined in the laboratory in this case and thus no comparisons can be made between laboratory and field results.

The measured average settlement, which corresponds to a total amount of expelled water of 13.5 m³, agrees quite well with the change measured in water content of the clay and gas seems not to have been generated in this case.

The settlement of the ground surface at Scania Vabis, Södertälje, is 6 cm on an average at a consumed current of $28 \cdot 10^9$ C, corresponding to a consumed energy of 830 MWh, FIG. 3. The significant increase in energy consumption per cm of settlement which can be seen at about 400 MWh may be due to the fact that the part of the anodes to be found in the clay were then mainly consumed by electrolytic corrosion (or possibly cut off) which would result in a sudden increase of anode to soil resistance. No doubt, part of the applied current has passed through the sand fill which is situated above the clay layer underneath the ground water level and

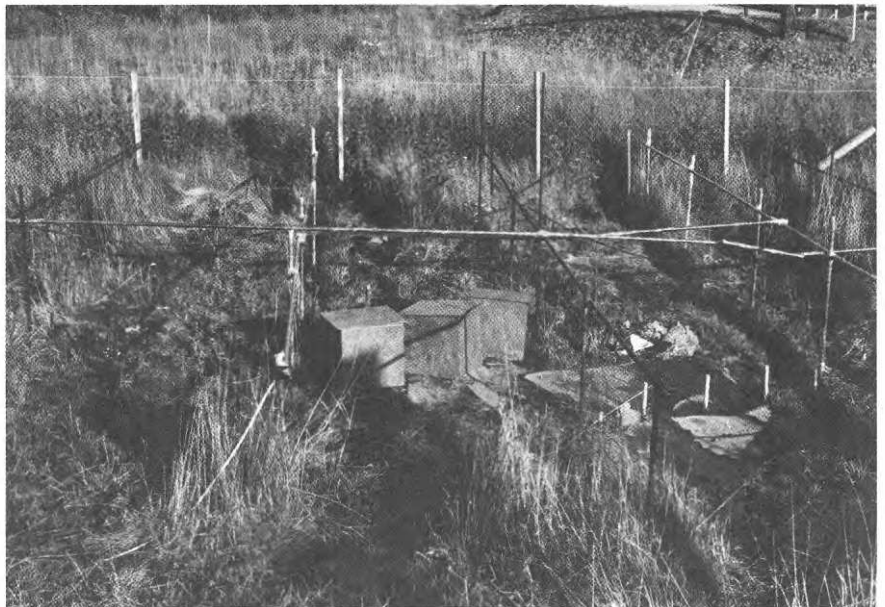


FIG. 2. *Electro-osmotic stabilization of clay at Östra sjukhuset, Gothenburg. The picture shows test field No. 1 with electrodes and mutual connections of 1 in. reinforcing bars. Thanks to the low electrical potential applied to the fields, no insulation was required. Nevertheless, the cathodes and the connecting bars between the cathodes were wrapped in insulating plastic tape. The boxes visible in the photograph contain manometers for the pore pressure measurements.*

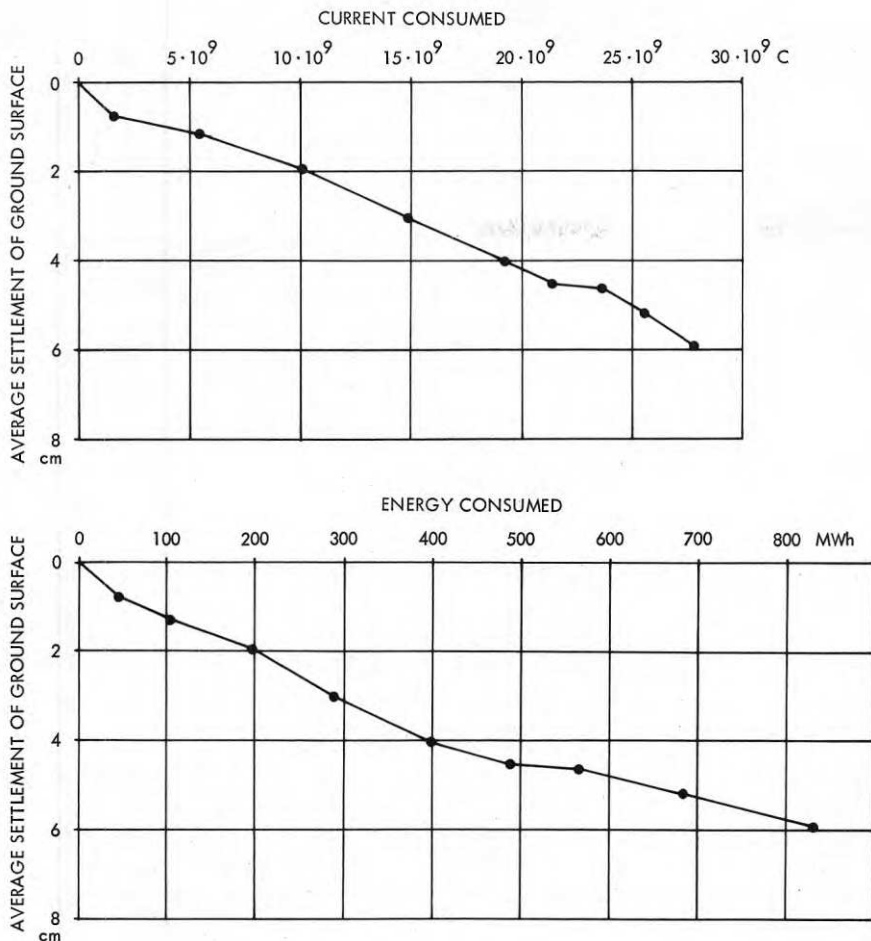


FIG. 3. Average settlement of ground surface as function of electric current and energy consumed, in the latter case including the loss of energy in the D.C. transformer. As can be seen the consumed energy per cm of settlement has increased considerably at about 400 MWh.

through the sand deposits below the clay layer. A rough estimate of the amount of current that has passed through the clay layer itself indicates that the volume of expelled water (or the volume decrease) per consumed current unit is $0.005\text{--}0.006\text{ cm}^3/\text{C}$. This value is much smaller than the values obtained in the laboratory (the product $k_e \rho$) which has the order of magnitude of $0.02\text{ cm}^3/\text{C}$. A possible explanation of this great difference between field and laboratory values can be found in the fact that hydraulic water flow will occur in the opposite direction to the electro-osmotic water flow due to high pore water pressure close to the cathodes and low pore water pressure close to the anodes. This hydraulic flow is facilitated in this case by horizontal seams of silt and sand in the clay.

The settlements measured correspond well with the changes in natural water content measured and gas is therefore unlikely to have been generated to any appreciable degree.

At *Östra sjukhuset, Gothenburg*, the settlement at a depth of 5 m below ground surface is 12 cm on an average at a consumed current of $0.8 \cdot 10^9\text{ C}$, FIG. 4, except of test field 1 with electrodes of 1 in. reinforcing bars. However, the discrepancy observed in field 1 can be explained by the fact that an in-

creasing part of the applied current has passed through the upper part of the clay layer, above the settlement meters in question (due to electrolytic corrosion). The observations show, as expected, that the required electric energy per cm of settlement decreases with increasing electrode diameter, FIG. 5. The great quantity of shells in the upper parts of the clay layer (down to approximately 5—6 m of depth) at *Östra sjukhuset* caused such intensive gas generation during the process of electro-osmosis that swelling occurred instead of compression. The settlement observed at a depth of 0.5 m below ground surface is thus smaller than at a depth of 5 m. This result which was also confirmed by laboratory tests shows that generation of gas can sometimes be of predominant importance and must be taken into account in calculating the compression of clay due to electro-osmosis. The product $k_e \rho$ in the calculation formulae should therefore be exchanged for amount of water transported ($=k_e \rho$) minus amount of gas generated per unit of electric current consumed, FIG. 6. The electro-osmotic data on the clay in the laboratory should be determined at the same effective over-burden pressure as at the level where the soil sample once was taken.

From FIG. 4 and the area covered by

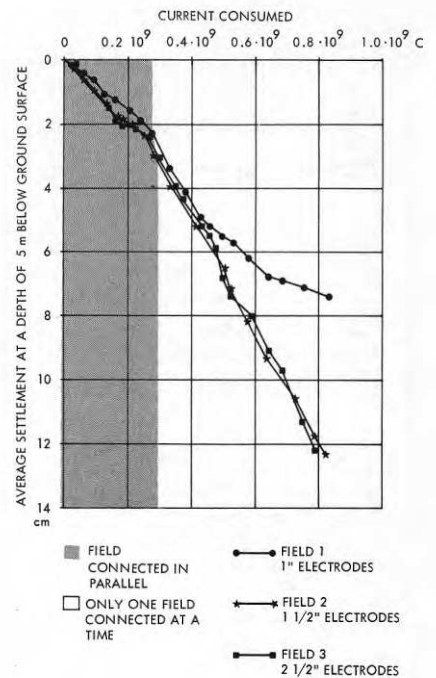


FIG. 4. Average settlement at a depth of 5 m below ground surface at *Östra sjukhuset* as function of electric current consumed. In test field 1 with 1 in. electrodes a significant decrease of efficiency can be observed at $0.43 \cdot 10^9\text{ C}$.

the installation it is found that the decrease of clay volume below a depth of 5 m is $0.007\text{--}0.008\text{ cm}^3/\text{C}$ when the potential was applied to all the three test fields connected in parallel and $0.014\text{--}0.015\text{ cm}^3/\text{C}$ when the potential was applied to only one test field at a time. The resulting difference can be explained by a decrease in pore water pressure obtained close to the anodes and a corresponding increase in pore water pressure obtained close to the cathodes. This pore pressure difference causes hydraulic flow from the cathodes towards the anodes, i.e. in the opposite direction of the electro-osmotic water flow. An analysis based on the pore pressure measurements shows that this hydraulic flow cannot be neglected and that it has the greatest influence on the results when the potential is applied to all three fields at a time. If the values previously given are corrected with regard to the hydraulic back-flow the decrease of clay volume is found to be $0.016\text{--}0.017\text{ cm}^3/\text{C}$ when all fields were connected in parallel and $0.015\text{--}0.017\text{ cm}^3/\text{C}$ when the potential was applied to only one field at a time, i.e. approximately the same values. As can be seen in FIG. 6 the effect of electro-osmosis in the field is less than on the laboratory samples where the values $0.040\text{--}0.045\text{ cm}^3/\text{C}$ were obtained.

It has not been possible to calculate from the laboratory values the amount of swelling of the upper 5 m thick clay layer, since the amount of gas disappearing, e.g. through fissures in the soil, is unknown.

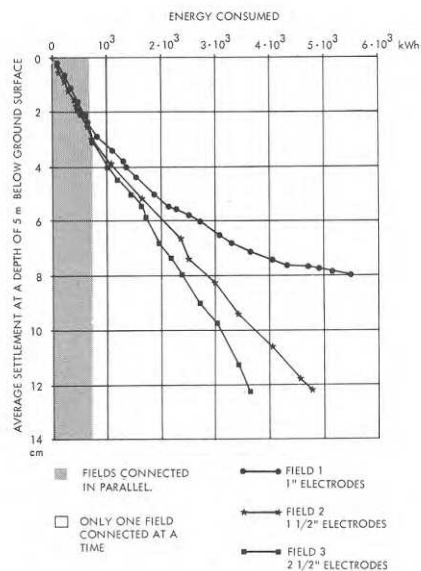


FIG. 5. Average settlement at a depth of 5 m below ground surface at Östra sjukhuset as function of consumed electric energy, excluding the loss of energy in the D.C. transformer. In test field 1 the consumed energy per cm of settlement has increased significantly at 2.1 MWh.

Effect of electro-osmosis on some characteristic clay data

The undrained shear strength τ_f increased heavily close to the anodes but usually decreased close to the cathodes where these were not formed as filter wells with pumping device. The increase of shear strength at Skå-Edeby where pumping at the cathodes took place was consequently more evenly distributed over the whole area and higher than in the other cases (50 % increase on an average at a consumed current of $0.4 \cdot 10^9$ C, corresponding to a consumed energy of 9.67 MWh).

The sensitivity S_f of the clay increased close to the cathodes in the tests at Scania Vabis and Östra sjukhuset, sometimes strongly. In one of the test fields at Östra sjukhuset the sensitivity increased on an average all over the area. This result is diametrically opposite to that obtained by the Norwegian Geotechnical Institute at Ås in Norway.

The fineness number w_F decreased close to the cathodes, probably due to electro-foreses. This decrease probably explains the observed increase in sensitivity.

The pre-consolidation pressure in the clay seems to have increased close to the anodes. Otherwise, no certain conclusions can be drawn. In the case of Skå-Edeby the pre-consolidation pressure was not determined, but with the guidance of other results obtained it is likely that a greater and more even increase in pre-consolidation pressure was obtained there than in the other cases.

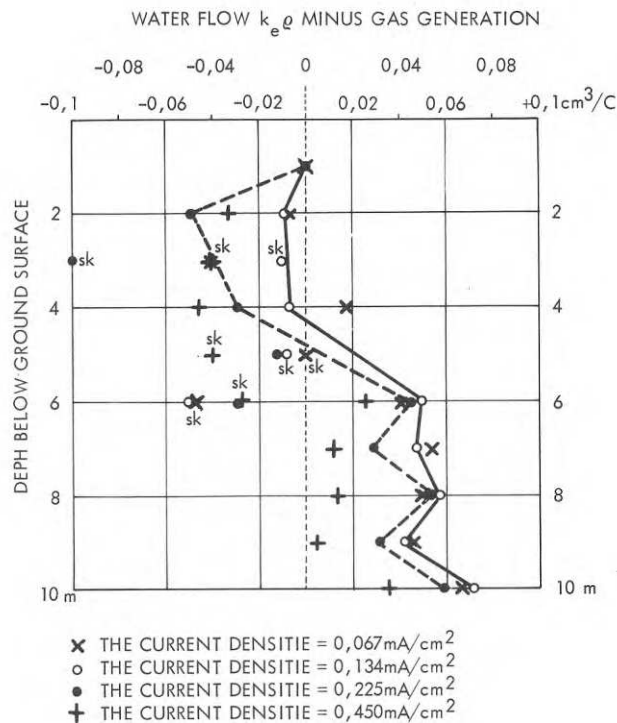


FIG. 6. Water flow minus gas generation measured in electro-oedometer on samples taken about 60 m NW of the test fields. The tests were performed at different current densities, chosen in order to correspond to field conditions. The broken and full-line curves represent in broad outline the field conditions when potential was applied only to one field at a time. During the test the sample was subjected to the same effective over-burden pressure as in natural condition.

Need of research

In cases where the cathodes were not formed as filter wells with a pumping device some rather unexpected effects were obtained on shear strength and sensitivity in particular and also an unexpectedly small effect on pre-consolidation pressure. Clarification of the importance of the set-up of cathodes and of pumping in particular would be extremely desirable. Further study of electro-osmosis accordingly should include comparisons between electro-osmotic installations where in one case the cathodes are formed as filter wells with pumping device and where in the other case anodes and cathodes are made equal.

Aspects on the analysis of electro-osmotic installations

On the basis of the observations at Skå-Edeby, Fredén recommends that the current density through the anode surface should not exceed 2—3 mA/cm² in order that the applied potential gradient should remain stationary. However, the observations made at Östra sjukhuset in Gothenburg show that this problem is far more complicated than one might believe with the guidance of the results obtained at Skå-Edeby. It is found among other things that the voltage gradient in the soil between anodes and cathodes is always subjected to variations. With the

strengths of current applied (original current density < 1 mA/cm² at Östra sjukhuset and about 5 mA/cm² at Scania Vabis) the condition in the installation systems as a whole can be regarded as stationary, i.e. until the electrolytic corrosion of the anodes started to assert itself.

For the analysis it is necessary that one can calculate in advance, from the soil resistivity ρ determined in the laboratory, the relation between potential and current of any chosen system of electrodes. The investigations at Scania Vabis and Östra sjukhuset show that the correlation between theory and reality in this respect is good. The results indicate that the error introduced, when regard is paid only to the electrode to soil resistance and not to the soil resistance, has no practical significance.

The electrolytic corrosion of the anodes which can be calculated from Faraday's law is an important factor that must not be forgotten in the analysis.

The investigations show that the heating of the electrodes (Joule's law) can be considerable, both with regard to the anodes and the cathodes, and that this heating may give rise to thermal flow of pore water which may not be neglected. The heating of the anodes is furthermore increased the more the anodes are consumed by electrolytic corrosion and this might lead to desiccation of the soil close to the anode surface and thus heavily increase the anode to soil resistance.

Rapport R19:1970

ERFARENHETER FRÅN AVVATTNINGSFÖRSÖK MED ELEKTROOSMOS I
NÅGRA SVENSKA LEROR

FINDINGS FROM DEWATERING TESTS WITH ELECTRO-OSMOSIS IN
SOME SWEDISH CLAYS

Sven Hansbo

Statens institut för byggnadsforskning, Stockholm

Rotobekman 1970 10 8519 0

INNEHÅLL

FÖRORD	5
1 PRINCIPER FÖR PRAKTISK DIMENSIONERING AV ELEKTROOSMOSANLÄGGNINGAR	7
2 ELEKTROSMOTISK AVVATTNING AV LERA I SÖDERTÄLJE	10
2.1 Grundförhållanden	10
2.2 Dimensionering av elektroosmosanläggningen	15
2.3 Den elektriska behandlingen	18
2.4 Uppmätta sättningar	18
2.5 Inverkan på lerans egenskaper	22
2.6 Kontroll av beräkningsmetoder	25
3 ELEKTROSMOTISK AVVATTNING AV LERA I GÖTEBORG	27
3.1 Grundförhållanden	27
3.2 Dimensionering av elektroosmosanläggningen	28
3.3 Den elektriska behandlingen	31
3.4 Uppmätta sättningar	32
3.5 Inverkan på lerans egenskaper	43
3.6 Spänningsfall mellan anod och katod	50
3.7 Portryck	50
3.8 Kontroll av beräkningsmetoder	54
3.9 Jämförelse med försöket i Skå-Edeby	65
4 SLUTORD	69
LITTERATUR	71

FÖRORD

Stabilisering av finkorniga jordar med elektroosmos har sedan länge med framgång tillämpats i utlandet. Metoden utvecklades i huvudsak av Leo Casagrande 1947 som också ledde en av de i Skandinavien mest kända och framgångsrika praktiska tillämpningarna i samband med schaktningen för ubåtshamnen i Trondheim under andra världskriget (Casagrande 1947). För närvarande tillämpas metoden i mycket stor skala och med gott resultat vid schaktningsarbetena för tunnelbanan i Mexico City. Bland andra framgångsrika tillämpningar av elektroosmos kan nämnas stabilisering och konsolidering av kvicklera i Ås i Norge (Bjerrum et al. 1967).

I Sverige, i Skå Edeby, gjordes fältförsök i mindre skala med elektroosmotisk avvattning av lera som ett led i utredningen om en blivande storflygplats 1957-58 (Fredén 1962). Bortsett härifrån torde elektroosmos inte ha använts i Sverige, vare sig försöksmässigt eller praktiskt, förrän åren 1965-66 då grundläggningsarbetena pågick för chassiverkstaden till Scania Vabis i kv. Bilbyggaren i Södertälje och åren 1966-67 då försök med elektroosmos utfördes vid utbyggnaden av Östra Sjukhuset i Göteborg. Resultaten från Södertälje och Göteborg kan alltså vara av stort intresse, även om erfarenheterna inte blivit helt positiva och resultaten till vissa delar är svåra att analysera dels genom inhomogena grundförhållanden, dels genom att vissa betydelsefulla undersökningar inte kunnat genomföras.

Den elektroosmotiska vattentransporten kan uttryckas genom sambandet

$$v_x = -k_e \frac{\partial U_x}{\partial x} \quad (1)$$

där

v_x = strömningshastigheten i x -riktningen hos porvatt-
net till följd av elektroosmosen, cm/s

k_e = elektroosmotiska permeabilitetskoefficienten,
cm²/sV

U_x = elektrisk spänning i x -riktningen, V

I praktiken inträffar kombinerad elektroosmotisk och hydraulisk strömning, och ekv. (1) ändras till

$$v_x = -k_e \frac{\partial U_x}{\partial x} - \frac{k}{g\gamma_w} \cdot \frac{\partial u}{\partial x} \quad (2)$$

där

k = hydrauliska permeabilitetskoefficienten, cm/s

u = porvattentrycket, N/cm²

g = jordaccelerationen, m/s² (N/kg)

γ_w = vattnets densitet, kg/cm³ = 10⁻³

Såväl k_e som k minskar snabbt med minskande vattenhalt (portal).

Försummar man den hydrauliska strömningen vid sidan av den elektroosmotiska och antar plant strömningstillstånd, kan vattentransporten uttryckas genom sambandet (Schaad 1958)

$$Q_w = k_e \frac{U}{x} A t f(t, c_v) \quad (3)$$

där

Q_w = transporterad vattenmängd under tiden t ,
cm³

U/x = spänningsgradient, V/cm

A = tvärsnittsarea, cm^2

t = tid, s

$f(t, c_v)$ = tid - konsolideringsfunktion som har begynnelsevärde 1 och avtar med tiden

Genom insättning av $U = \rho \frac{x}{A} I$ erhålles

$$Q_w = k_e \rho I t f(t, c_v) \quad (4)$$

där

I = strömstyrkan, A

ρ = resistivitet i jord, Ωcm

Resistiviteten i jord ρ ökar snabbt med minskande vattenhalt.

Om katoderna inte utformas som filterbrunnar, ur vilka det tillströmmande vattnet pumpas bort, är det tveksamt om ekv. (3) eller (4) med tillfredsställande noggrannhet beskriver strömningsförloppet. Ett porvattenövertryck uppstår nämligen vid katoderna och ett porvattenundertryck vid anoderna. Dessa portrycksändringar ger upphov dels till en fri avrinning av ytvatten vid katoderna, dels till en mot den elektroosmotiska strömningen riktad hydraulisk strömning. För att få tillfredsställande noggrannhet kan det därför i vissa fall vara nödvändigt att tillämpa ekv. (2). Den verkliga effektivitetsminskningen, som erhålls genom att det till katoderna tillströmmande vattnet inte pumpas bort, torde emellertid i praktiken vara svår att beräkna.

Med kännedom om resistiviteten i jord ρ kan övergångsresistansen R mellan en stavformad elektrod och jorden beräknas (Kupfmüller 1959) ur sambandet

$$R = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{4l}{d} \quad (5)$$

där

l = elektrodens längd

d = elektrodens diameter

Den totala övergångsresistansen R_n för n parallellkopplade elektroder kan beräknas ur sambandet, jämför Moun (1967)

$$R_n = \frac{f}{n} R \quad (6)$$

där

$$f = 1 + \frac{\ln [(\cot \frac{\theta_2}{2}) \dots (\cot \frac{\theta_n}{2})]}{\ln (\frac{8l}{d}) - 1}$$

$$\theta_n = \operatorname{arccot} (l/ns)$$

n = antalet parallella elektroder

s = elektrodavstånd

Anodförbrukningen ΔG_a beräknas enligt Faradays lag

$$\Delta G_a = \frac{Q_e}{96500} \cdot \frac{\text{atomvikt}}{\text{valens}} (= 0,29 Q_e \text{ mg vid tvåvärdigt järn}) \quad (7)$$

där

Q_e = strömförbrukningen i anoderna, uttryckt i coulomb (ampère-sekund)

Förutom den konsolidering som erhålls genom elektroosmotisk vattentransport i riktning mot katoden, inträffar också en elektroforetisk vandring av negativt laddade partiklar mot anoden. Elektroforesen ger upphov till en i riktning mot anoden ökande strukturtäthet. Även vid förhindrad vattenavgång erhålls alltså en konsolideringseffekt genom elektrofores. Elektroforesen ger enligt Evans & Lewis (1965) upphov till dispersionseffekter vid katoden. Samma författare visar också att det elektroforetiska "konsolideringstrycket" växer linjärt från katod till anod.

Vid planeringen av området för den blivande chassiverkstaden för Scania Vabis i kv. Bilbyggaren, Södertälje, gjordes omfattande fyllningsarbeten, bl a under blivande golv. Denna uppfyllning liksom den projekterade golvbelastningen i verkstaden skulle, om inga särskilda åtgärder vidtogs, medföra stora och intolerabla sättningar. För att säkerställa byggnadens funktion var det därför nödvändigt att utföra någon form av grundförstärkning. Man hade då att välja mellan två olika lösningar: antingen på grundläggning av golvet eller grundläggning på mark efter konsolidering av underliggande lerlager. Konsolideringen kunde tänkas åstadkommen genom antingen vertikaldränering med tillfällig överbelastning av leran eller elektroosmos. Med hänsyn till den korta tid, 8 månader, som stod till förfogande skulle vertikaldräneringen kräva mycket stora tillfälliga överlaster och därmed medföra avsevärda nackdelar från arbetssynpunkt. Vertikaldräneringen kunde därför inte komma i fråga. I valet mellan pålning och avvattning med elektroosmos bestämde man sig slutligen, efter ekonomiska överväganden och efter att ha fått ta del av de gynnsamma resultaten från Ås i Norge (Bjerrum *et al.* 1967), för elektroosmos.

2.1 Grundförhållanden

Det aktuella området är beläget på platsen för en tidigare sjö, Katthavet, FIG 1 a och b, som före byggnadsarbetena hade en längd av 450 m och en bredd av mellan 40 och 100 m. Sjöns yta låg strax under nivån +4,0 (den varierade under augusti-oktober 1962 mellan +3,65 och +3,95) och dess största djup var 2 m. Sjön hade vid tiden för installeringen av elektroosmosanläggningen fyllts med ett mellan 6 och 7 m mäktigt lager av sand och grus till nivå ca +8,0. Under fyllningen kvarligger enligt de gjorda undersökningarna ett maximalt 4 m mäktigt lager av varvig lera, mjäla och mo - i huvudsak varvig lera med moskikt. Jordlagerföljden är enligt undersökningarna starkt skiftande, vilket framgår av FIG 2.



FIG. 1a. Vy över Katthavet tagen sedan igenfyllningen med sand och grus påbörjats. Elektroosmosfältet blev senare placerat vid pilen.

View of Katthavet after filling with sand and gravel had started. The electro-osmotic installations were later made at the arrow.



FIG. 1b. Vy av elektroosmosfältet sedan elströmmen påkopplats. Byggnaden t.v. i bilden är samma byggnad som uppförs t.v. i FIG. 1a.

View of electro-osmosis field after current had been applied. The building to the left is that one which is being built in FIG. 1a.

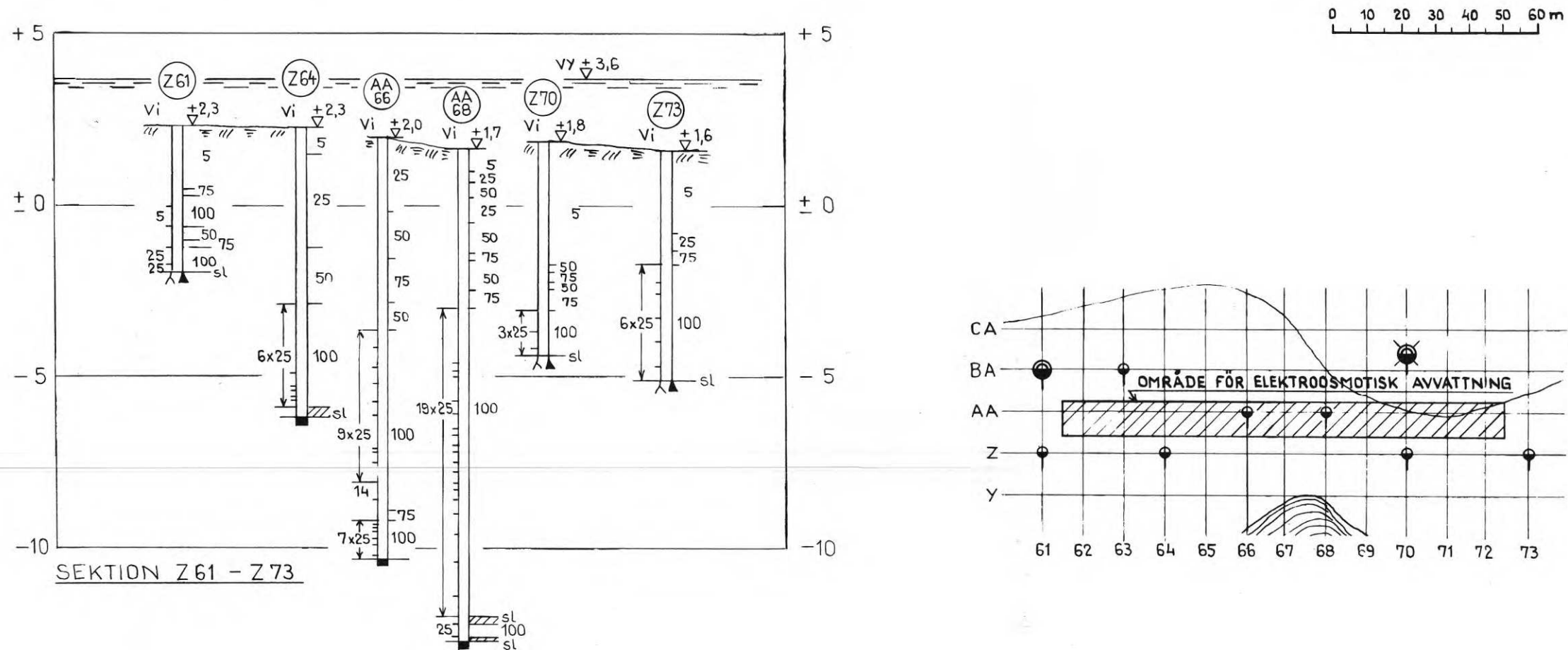
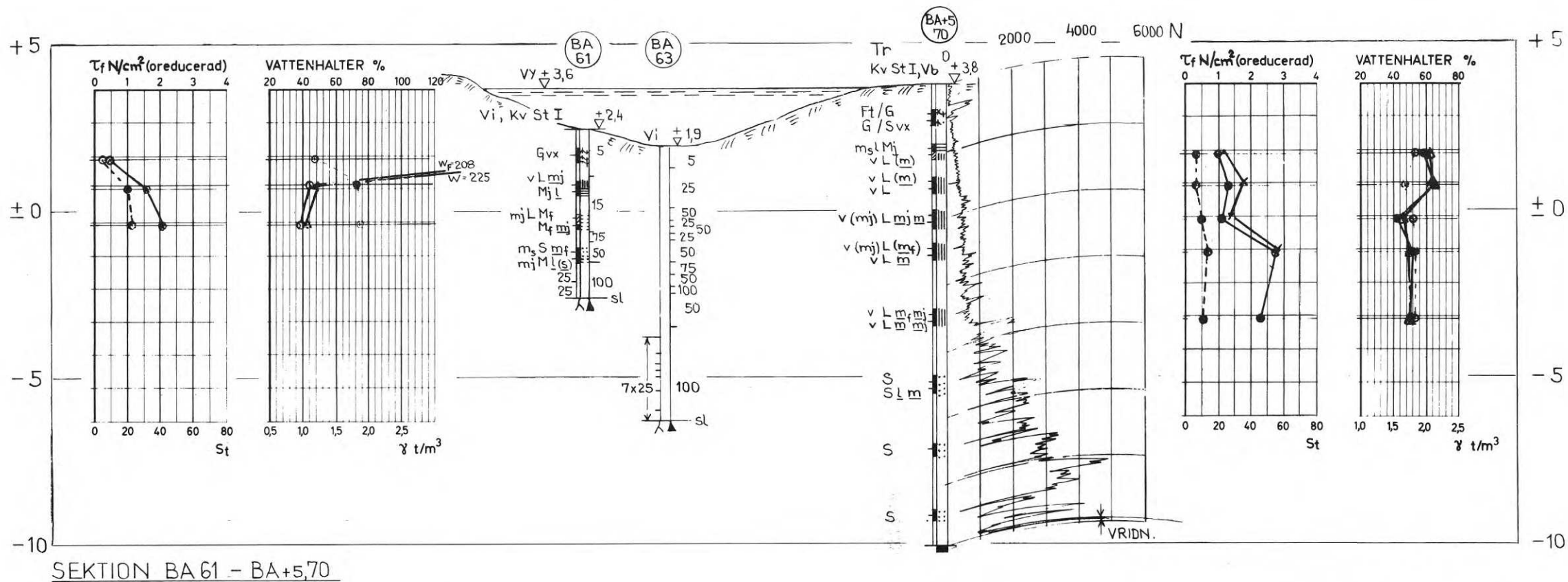


FIG. 2. Plan och sektion över sondborrningar och provtagningar före markplaneringen av området. Det angivna koordinat-systemet är Scania Vabis eget system för området.

Plan and section of sound borings and samplings carried out before the ground levelling of the area.

Grundvattenytan låg på i stort sett samma nivå som Katthavet. Lerans odränerade skjuvhållfasthet, bestämd med fallkon, var ca $1,5 \text{ à } 2 \text{ N/cm}^2$ ($1 \text{ N/cm}^2 = 0,102 \text{ kp/cm}^2$) och dess sensitivitet i regel mellan 5 och 20. Den högsta uppmätta sensitiviteten hos leran var 27 och hos mjälan 34 inom hela det sedimentområde som omger Katthavet. Omedelbart intill det med elektroosmos senare behandlade området uppmättes för lera sensitiviteten högst 20.

Övriga data för leran framgår i stort av följande sammanställning:

Vattenhalt, w	40 - 70 %
Finlekstal, w_F	30 - 65 %
Salthalt hos porvattnet	2,9 - 3,7 g/l
Elektroosmotisk permeabilitetskoefficient, k_e	$0,3 \cdot 10^{-4} - 2,2 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{sV}$
Resistivitet i jord, ρ	510 - 630 Ωcm
Rel. kompression, ε_2	5 - 10 %
Konsolideringskoefficient, c_v	$\geq 0,5 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{s}$

2.2 Dimensionering av elektroosmosanläggningen

Utgångspunkt för dimensioneringen av elektroosmosanläggningen var önskemålet att öka förkonsolideringstrycket hos leran, mätt i lerlagrets mitt, från ursprungsvärdet $6,5 \text{ N/cm}^2$ till 13 N/cm^2 motsvarande effektivtrycket efter påförd belastning. Denna ökning beräknades kräva en relativ kompression av 10% av lerlagrets tjocklek, d v s maximalt ca 40 cm. Dimensioneringen utfördes av NGI (Norges Geotekniske Institutt), som ansågs ha nödvändig erfarenhet av liknande arbeten, i samarbete med ingenjörsfirman Jacobson & Widmark AB. Som grundval för dimensioneringen valdes ekv. (4) med ett insatt värde på $k_{e\rho}$ av $0,02 \text{ cm}^3/\text{C}$. För att uppnå önskad vattenavgång på det $135 \times 8 \text{ m}^2$ stora området inom den angivna tiden (8 månader), föreslogs en strömstyrka I av 1000 A. Detta ger enligt (4) med $f(t, c_v) = 1$ en total vattenavgång av

$$Q_w = 0,02 \cdot 1000 \frac{2}{3} \cdot 3,15 \cdot 10^7 \cdot 10^{-6} = 424 \text{ m}^3$$

d v s mer än som fordrades för att uppnå den relativa kompressionen 10 %.

Anläggningen föreslogs bli utformad med 36 anoder och 22 katoder, FIG 3. Som elektroder valdes järnvägsräler med vikten 25 kg/m, vilka kunde slås ner genom den tjocka fyllningen och leran till nivån -4 à -5 m. Övergångsresistansen mellan elektrod och jord beräknades enligt ekv. (5) med $\rho = 600 \Omega \text{ cm}$ och antagen verksam längd $l = 5 \text{ m}$ (övergången mellan fyllningen och underliggande, finkornigare jord osäker) till $1,1 \Omega$ per elektrod, vilket ger en överslagsmässig total övergångsresistans av

$$R_{\text{tot}} = \frac{1,1}{36} + \frac{1,1}{22} = 0,081 \Omega$$

Görs en noggrannare kalkyl enligt ekv. (6) erhålles $f_{\text{anod}} = 1,29$ och $f_{\text{katod}} = 1,13$, varav

$$R_{\text{tot}} = \left(\frac{1,29}{36} + \frac{1,13}{22} \right) \cdot 1,1 = 0,096 \Omega$$

För att få likström användes en svetsomformare. Under antagande att den totala resistansen mellan anoder och katoder är lika med totala övergångsresistansen mellan elektroder och jord beräknades enligt Ohms lag erforderlig spänning till $U \approx 0,08 \cdot 1000 \approx 80 \text{ V}$ (96 V med noggrannare kalkyl).

En beräkning av inverkan av resistansen i jorden mellan anoder och katoder blir både mödosam och osäker - mödosam på grund av det stora antalet anod- och katodrader; osäker på grund av att strömningstillståndet ej är plant. Det fel som begås genom att försumma jordresistansen torde emellertid i regel kunna accepteras vid praktisk dimensionering om resistiviteten i jord i stället väljs konservativt, jämför avsnitt 3.8.

2.3 Den elektriska behandlingen

Elektroosmosanläggningen togs i bruk den 20 juli 1965. I början var strömstyrkan ca 1100 A men höjdes senare, först till 1500, därefter till 1800 A. Strömstyrkan hölls därefter konstant under ca 3 månader. Härvid sjönk erforderlig spänning från ca 90 V till 70 V. Strömstyrkan sänktes därefter till 1700 A. Omkring den 20 november, d v s då anläggningen varit i bruk 125 dygn, inträffade en plötslig och mycket markant ökning av resistansen, vilken tydde på att anoderna helt eller i det närmaste förbrukats ända upp till eller strax intill grundvattennivån. Strömstyrkan kunde nu inte bibehållas vid samma storlek som tidigare utan måste sänkas till 1200 A. Resistansökningen i jorden blev emellertid allt besvärligare att bemästra, och anläggningen togs ur bruk den 24 januari 1966.

För att studera anodförbrukningen drog man efter försöket upp en av de elektroder som enligt uppgjorda planer skulle tjänstgöra som anod. Denna visade sig då vara helt oanfrätt, medan en därpå uppdragen katod var mycket starkt anfrätt, FIG 4. Anläggningen hade följaktligen varit felkopplad och hade i stället för 36 anoder och 22 katoder kommit att bestå av 22 anoder och 36 katoder.

2.4 Uppmätta sättningar

Under elektroosmosbehandlingen gjorde man kontinuerliga sättningsobservationer genom finavvägning av markpeglar som består av horisontella stålplattor på frostfritt djup med påsvetsade rör. Mätnoggrannheten, kontrollerad genom dubbelavvägningar, synes härvid ha varit ± 4 mm. De uppmätta medelsättningarna redovisas i FIG 5 som funktion av tillförd elmängd och elektrisk energi. Sättningen i två sektioner längs med elektroosmosfältet visas i FIG 6.

Sättningarna har som framgår av FIG 5 utbildats i direkt proportion mot elmängden helt i överensstämmelse med ekv. (4). Den nämnda ökningen av resistansen i systemet omkring den 20 november, representerande ca 400 MWh energiförbrukning, avspeglas i



FIG. 4. Bilden visar en uppdragen anod, enligt kopplingsschemat avsedd som katod, sedan elströmmen brutits och försöket avslutats. Anoden är som synes starkt anfrätt och så het att den ångar, trots den långa tid som förflutit sedan strömmen brutits (14 dgr).

The picture shows one of the anodes (which according to the electrical circuit diagram was intended to be a cathode) after the current was broken and the test finished. The anode is heavily corroded and so hot that it is steaming in spite of the long time which has elapsed since the current was cut off (14 days).

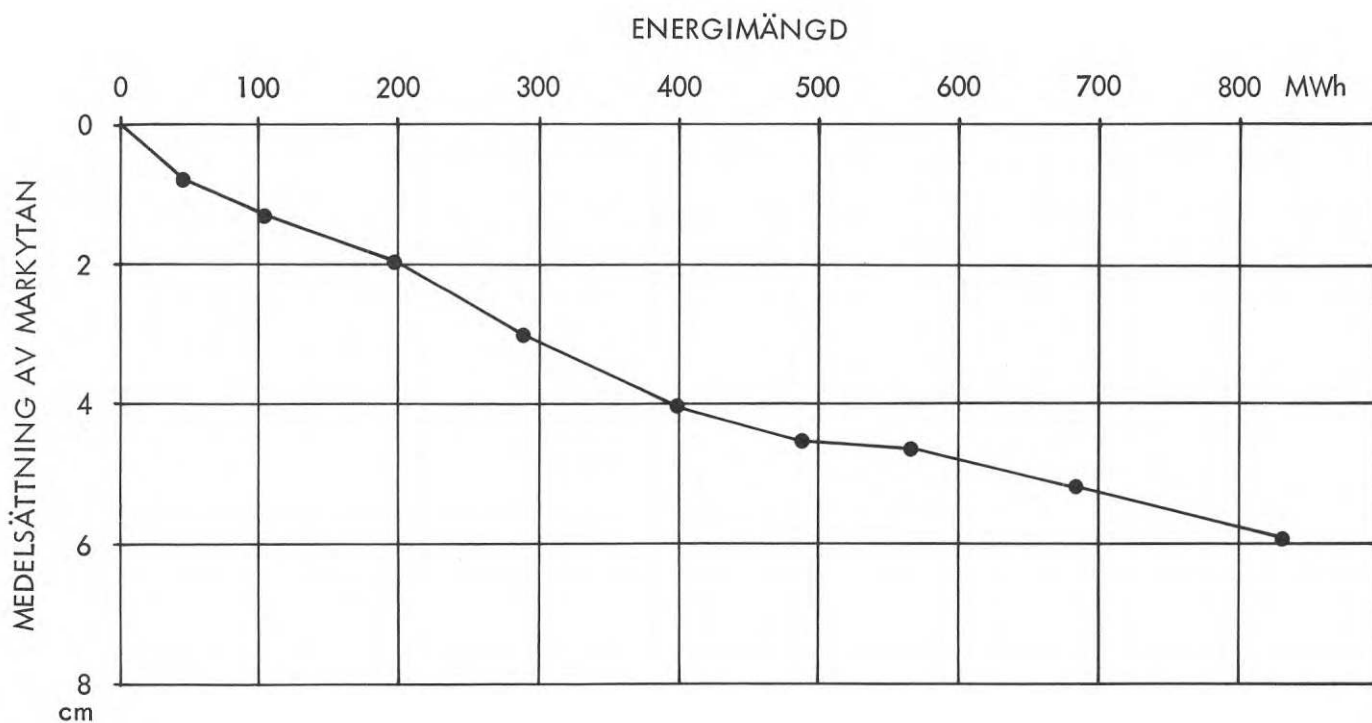
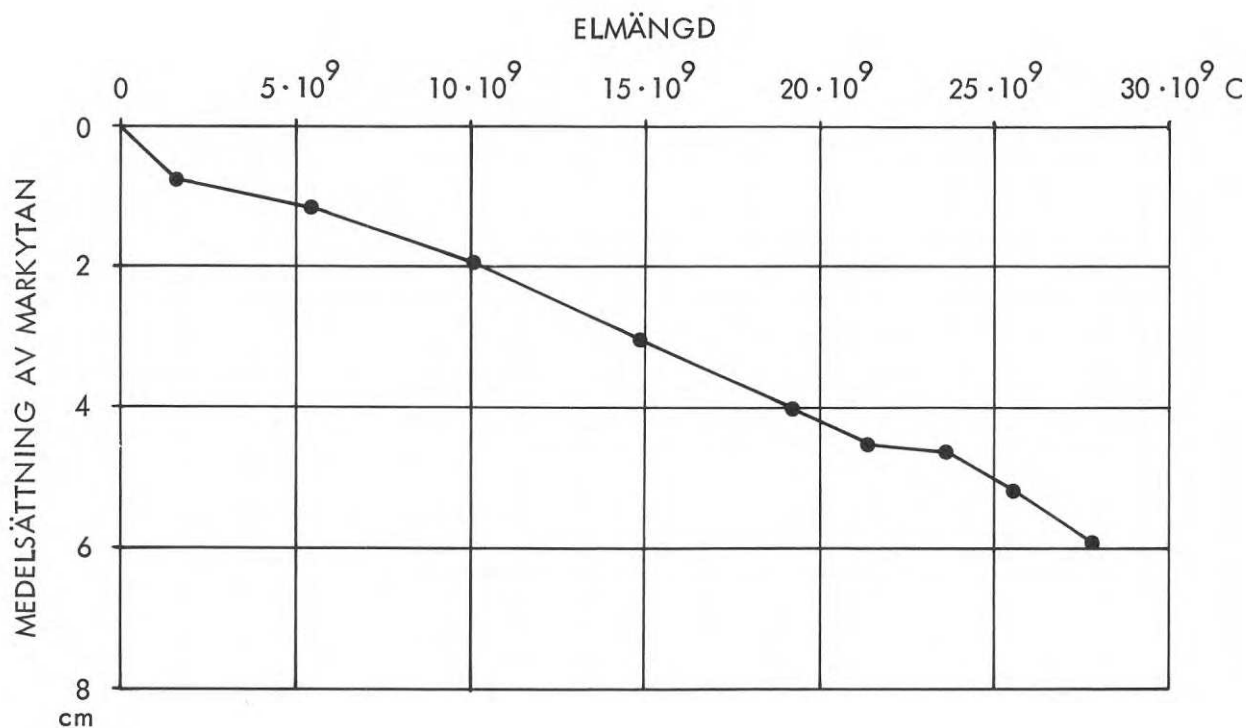


FIG. 5. Uppmätt medelsättning inom elektroosmosfältet som funktion av tillförd elmängd och elektrisk energi. Energiförbrukningen per cm sättning har som framgår ökat markant efter ca 400 MWh.

Measured average settlement within the electro-osmosis field as function of electric current and energy consumed. The energy required per cm of settlement has increased significantly after about 400 MWh.

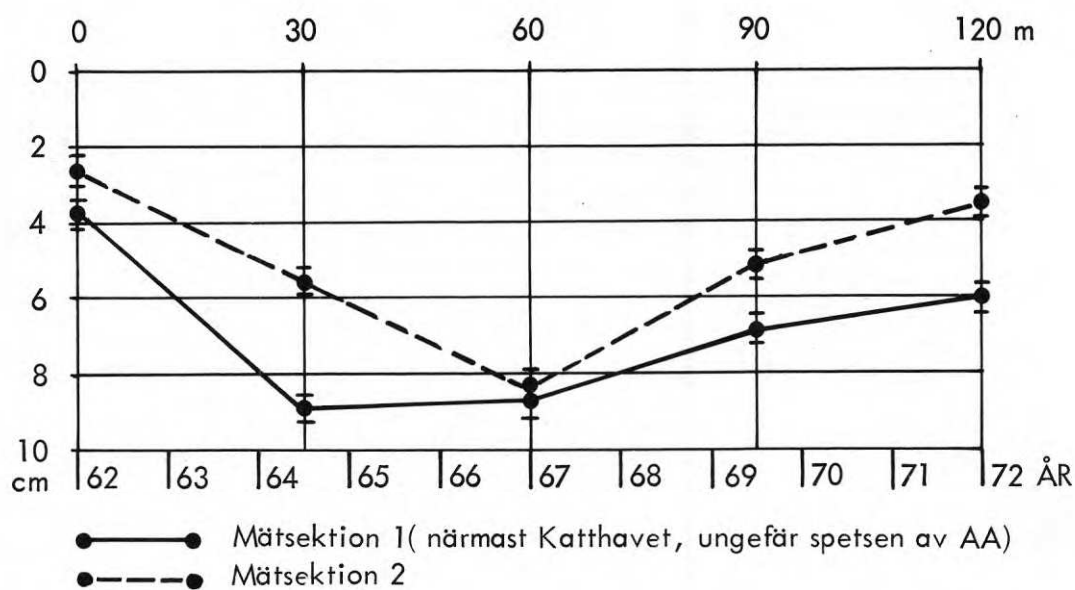


FIG. 6. Sättningar vid elektroosmosens avslutning längs de i FIG. 3 givna mätsektionerna i elektroosmosfältets längdriktning. De vertikala staplarnas längd i observationspunkterna anger ungefärlig mät noggrannhet.

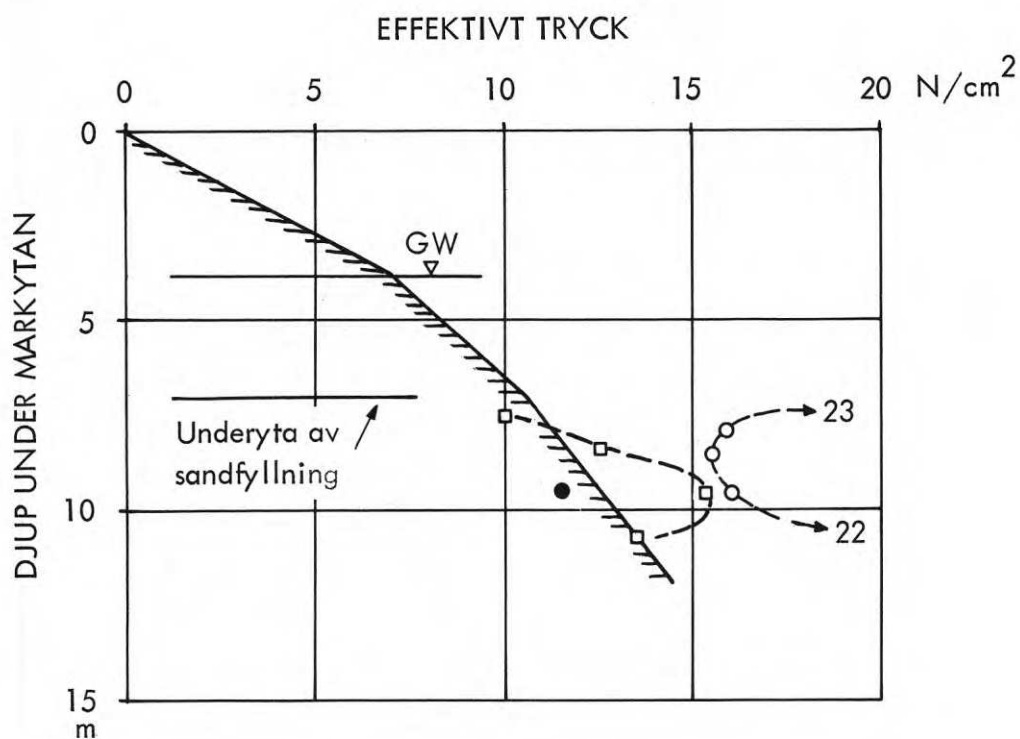
Settlements after the end of electro-osmosis in the given measuring sections along the electro-osmosis field. The accuracy of measurements is indicated at the observation points through heavy vertical lines.

energi-sättningskurvan på så sätt att kurvan efter detta datum blivit markant utflackad. Energiåtgången för att åstadkomma avvattningen är alltså efter detta datum väsentligt högre än förut.

Med utgångspunkt från det i FIG 5 givna sambandet mellan medelsättning och tillförd elmängd finner man att den erhållna volymminskningen är ca $0,0028 \text{ cm}^3/\text{C}$. Volymberäkningen har här gjorts under antagande att den i figuren angivna medelsättningen inträffat på ytan 1300 m^2 ; ett antagande som givetvis är något osäkert.

2.5 Inverkan på lerans egenskaper

Målsättningen för den elektroosmotiska avvattningen var, som tidigare nämnts, att åstadkomma en höjning av förkonsolideringstrycket i lerlagrets mitt till minst 13 N/cm^2 . För att kontrollera vid vilken tidpunkt detta mål hade uppnåtts utfördes med vissa tidsintervall provtagning i leran med standardkolvborr. Dessutom utfördes fältvingborrning och portrycksmätning under elektroosmosbehandlingens senare skede. Trots att sammanlagt 16 kolvborrningar utfördes är det ändå på grund av de heterogena förhållandena mycket svårt att dra säkra slutsatser om förändringarna i förkonsolideringstrycket och spridningen i försöksresultaten är stor. Det visade sig också vara mycket svårt att få ostörda prover (sannolikt genom den rikliga förekomsten av mo- och mjälaskikt med höga portryck), varför de ur ödometerförsök erhållna förkonsolideringstrycken sannolikt är lägre än i verkligheten. Även skjuvhållfasthetsvärdena, bestämda genom konförsök på proverna, visade sig osannolikt låga. En något säkrare metod för bestämning av förkonsolideringstrycket är därför att utgå från finlekstalet och skjuvhållfastheten bestämd med fältvingborr på motsvarande nivå (även om denna sannolikt är något för hög). Lämpligen väljs därvid i varje enskilt fall maximalvärdet på finlekstalet, då detta representerar den finkornigaste leran och ger det lägsta förkonsolideringstrycket. Förkonsolideringstrycket efter elektroosmosbehandlingen, bestämt genom ödometerförsök och enligt nämnda metod, visas i FIG 7. Den bästa effekten har som väntats erhållits vid anoden och det lägsta vär-



Effektivt överlagringstryck

- Förkonsolideringstryck σ_c vid katod, bestämt ur ödometerförsök (endast 1 prov)
- Förkonsolideringstryck mitt emellan anod och katod, bestämt ur sambandet $\sigma_c' = \sigma_v / 0,45 w_F$
- Förkonsolideringstryck σ_c' vid anod bestämt ur $\sigma_c' = \sigma_v / 0,45 w_F$

FIG. 7. Jämförelse mellan effektivt överlagringstryck, sedan sand- och grusfyllning lagts ut, och förkonsolideringsstryck på olika avstånd och djup mellan anoder och katoder.

Comparison of effective overburden pressure, after the sand and gravel filling had been completed, with pre-consolidation pressure at varying distances and depths between anodes and cathodes.

det på förkonsolideringstrycket är här $15,5 \text{ N/cm}^2$, alltså högre än erforderligt, medan förkonsolideringstrycket vid katoden är $11,5 \text{ N/cm}^2$ (endast ett prov). Mitt mellan anod och katod synes emellertid det önskade förkonsolideringstrycket 13 N/cm^2 i stort sett ha uppnåtts.

Vad gäller inverkan på lerans sensitivitet S_t har resultatet blivit diametralt motsatt det som NGI erhöll vid elektroosmosförsöken i Ås. Under elektroosmosens inverkan ökade nämligen sensitiviteten hos leran på ett markant sätt och i ett fall uppnåddes $S_t > 300$. I flera fall uppmättes $S_t = 40$ à 50 . Så höga sensitiviteter uppmättes, som tidigare påpekats, inte i något fall före behandlingen. Det är därför odiskutabelt att elektroosmosen lett till en ökning av sensitiviteten och ej till en minskning, vilket tidigare rapporterats från den elektroosmotiska avvattningen av kvicklera i Ås. Den största sensitivitetsökningen uppmättes in- till katoderna, vilket torde bero på elektrofores (Evans *et al.* 1965).

Efter avslutningen av elektroosmosen uppmättes i leran vattenhalter = 38 à 68 % och finlekstal = 30 à 60 %. Differensen mellan vattenhalt och finlekstal hade i medeltal ökat, vilket i princip stämmer överens med ökningen av sensitiviteten.

För en vattenmättad lera kan kompressionen beräknas ur vattenhaltsminskningen genom sambandet

$$\frac{\Delta h}{h_0} = \frac{\Delta w}{\gamma_w / \gamma_s + w_0} \quad (8)$$

där

$\Delta h/h_0$ = relativa kompressionen av lerlagret (med ursprunglig tjocklek h_0)

Δw = vattenhaltsminskning

w_0 = ursprunglig vattenhalt

γ_w = vattnets densitet

γ_s = fasta partiklars densitet

I detta fall har man genom den elektroosmotiska avvattningen erhållit 2 % minskning av den ursprungliga vattenhalten $w_0 = 40$ à 70 %.

Med $\gamma_s = 2,65 \text{ t/m}^3$ får man härav enligt ekv. (8)

$$\Delta h/h_0 = 0,0185 \text{ à } 0,0260$$

Med ett uppskattat värde $h_0 = 400 \text{ cm}$ skulle alltså vattenhaltsminskningen motsvara en sättning av ca 7,5 à 10,5 cm. Dessa värden stämmer väl överens med de uppmätta sättningarna i provtagningsområdet, nämligen 5,5 à 9,0 cm. Elströmmen synes alltså inte ha gett upphov till någon nämnvärd gasbildning i jorden, vilken skulle leda till svällning och därmed motverka sättningarna. Avvattningen av leran har därför utan tvivel blivit avsevärt mindre än beräknat, och elektroosmosmetoden kan från den synpunkten betraktas som misslyckad.

2.6 Kontroll av beräkningsmetoder

Anodförbrukning

Den konstaterade felkopplingen av anläggningen har givetvis medfört att anoderna förtärts snabbare än avsett. Antas homogena förhållanden råda, så att resistans mellan anoder och katoder överallt är likvärdig, erhålls vid den utförda kopplingen (22 anoder) och vid en total strömstyrka om 1800 A en maximal strömstyrka per anod om $1800/(2 \cdot 11) \approx 82 \text{ A}$. Järnförlusten vid varje anod kan då enligt ekv. (7) beräknas till $0,29 \cdot 82 \cdot 86400 \cdot 10^{-6} = 2,05 \text{ kg/dygn}$. Med en antagen verksam längd av 5 m skulle alltså anoderna vara förbrukade efter 61 dygn. Vid 8 - 10 m verksam längd (från grundvattenytan till fast botten) skulle anoderna vara förbrukade efter 98 - 122 dygn. De senare värdena stämmer väl överens med den observerade, plötsliga resistansökningen i jorden den 20 november 1965, FIG 5. Detta datum motsvarar här nämligen en tid av 115 dygn med en total medelströmstyrka av 1800 A. Man finner alltså att endast en begränsad del av strömmen passerat genom leran, vilket förklarar det förhållandevis dåliga avvattningsresultatet.

Slutsatsen att endast en begränsad del av strömmen passerat genom leran finner också stöd i relationen mellan använd spänning och strömstyrka. Vid exempelvis en antagen verksam längd hos elektroden av 9 m, erhålls enligt ekv. (5) och (6) en total övergångsresistans för systemet av $0,086 R$, där R = övergångsresistansen för en elektrod. Antas att den totala resistansen mellan anoder och katoder är lika med den totala övergångsresistansen i systemet erhålls med $I = 1800$ A och $U = 90$ V

$$R = \frac{90}{1800 \cdot 0,086} = \frac{\rho}{2\pi \cdot 900} \ln \frac{4 \cdot 900}{6,37}$$

varav $\rho = 518 \Omega\text{cm}$

Detta värde på ρ stämmer väl överens med de på laboratorium uppmätta värdena 510 - 630 Ωcm .

Avvattningen av leran

Det i avsnitt 2.4 erhållna värdet på volymminskningen $0,0028 \text{ cm}^3/\text{C}$ är mycket lågt i förhållande till de i laboratorium uppmätta värdena (produkten $k_e \rho$) som är av storleken $0,02 \text{ cm}^3/\text{C}$. Avvikelsen kan delvis bero på att en stor del av elmängden, som här påpekats, passerat genom den del av sandfyllningen ovan leran som är belägen under grundvattenytan och genom den sand som underlagrar leran. Proportioneras elmängden i direkt förhållande till tjockleken av sand- och lera-mjälalagren, ökar volymminskningen från tidigare beräknat värde $0,0028$ till ca $0,006 \text{ cm}^3/\text{C}$, alltså fortfarande mycket lägre värden än väntat.

En annan bidragande orsak till den stora differens som kvarstår efter omräkningen synes vara att man erhållit en mot den elektroosmotiska vattentransporten motriktad hydraulisk vattentransport av icke försumbar storleksordning, förorsakad av höga porvattentryck vid katoderna och låga porvattentryck vid anoderna. Den hydrauliska strömningen underlättas i detta fall genom förekomsten av horisontella mo- och sandskikt i leran och mjälan. Resultatet hade sannolikt blivit avsevärt bättre om katoderna utformats som filterbrunnar, varifrån pumpning utförts.

Vid utbyggnaden av Östra Sjukhuset i Göteborg krävs omfattande fyllningsarbeten på större delen av den lerterräng som ligger centralt inom sjukhusområdet. Fyllningen kommer, om motåtgärder inte vidtas, att ge upphov till stora marksättningar, inom de djupaste lerområdena beräknade till ca 1 m. Större delen av sättningarna skulle kunna åstadkommas redan före byggnadsarbetena genom exempelvis vertikaldränering av leran och lämpligt avvägd utfyllning (tillfällig överlast), men man skulle då få mycket stora stabilitetsproblem vid schaktningen för såväl källargrunder som kulvertar på grund av de genom fyllningen ökade schaktdjupen. För att få mindre schaktdjup skulle man visserligen kunna göra utfyllningen sedan byggnader och kulvertar utförts, men detta alternativ är inte tänkbart med hänsyn till sjukhusets drift. För att pröva andra möjligheter till jordförstärkning än vertikaldränering uppdrog Sjukvårdsstyrelsen i Göteborg åt ingenjörfirman Jacobson & Widmark AB att utföra försök med elektroosmos. Anläggningen planerades och installerades av ingenjörfirman Jacobson & Widmark AB år 1965, varefter försöken har utförts såsom examensarbeten (4 st) vid Institutionen för geoteknik med grundläggning vid CTH.

3.1 Grundförhållanden

Försöksfältet är beläget på den sankaste delen av åkern framför den nybyggda kvinnokliniken vid Östra Sjukhuset. Jorden består här av i huvudsak mjälig lera till 8 à 10 m djup med starkt inslag av snäckskal, huvudsakligen från 1 till 6 m djup. I markytan ner till ca 1 m djup är jorden grovkornigare, ofta med mossom huvudfraktion. Växtdelar förekommer till 2 à 3 m djup. På ca 10 m djup och därunder förekommer sporadiskt sand- eller mosskikt med varierande tjocklek. Grundvattennivån låg vid tiden för elektroosmosförsöket i eller obetydligt under markytan.

Lerans odränerade skjuvhållfasthet, bestämd med fallkon och fältvingborrh, var före elektroosmosförsöket i torrskorpan ca 3 - 5 N/cm² och därunder ca 1 - 2,4 N/cm² med mot djupet avtagande tendens. Lerans sensitivitet varierade mellan ca 10 och 100 med ökande värden mot djupet. I försöksfält 2 uppmättes på 8,5 m djup sensitiviteten 200 och på 10 m djup sensitiviteten 170.

Övriga data för leran framgår i stort av följande sammanställning:

Vattenhalt, w	20 - 80 %
Finlekstal, w_F	30 - 60 %
Elektroosmotisk permeabilitetskoefficient, k_e	0 - $0,8 \cdot 10^{-4}$ cm ² /sV (bestämd i ett senare skede)
Resistivitet i jord, ρ	560 - 3130 Ω cm (bestämd i ett senare skede)
Rel. kompression, ϵ_2	7 - 15 %
Konsolideringskoeff., c_v	10^{-4} - $5 \cdot 10^{-4}$ cm ² /s

Lerans geotekniska egenskaper visas mera detaljerat i FIG 8 a, b.

Leran synes genomgående vara överkonsoliderad med ca 2 - 4 N/cm² i förhållande till rådande effektivtryck. Under 5 m djup synes överkonsolideringen i stort sett vara konstant och ca 2 N/cm².

3.2 Dimensioneringen av elektroosmosanläggningen

Vid planeringen av anläggningen förelåg inga mätvärden på den elektroosmotiska permeabilitetskoefficienten och resistiviteten i jord, varför någon egentlig dimensionering inte kunde utföras. Avsikten med anläggningen var dessutom i första hand att finna lämpliga utgångsvärden för en avvattning av leran i större skala i det fall att man inte på något sätt underlättade vattenavgången vid katoderna. Man avsåg också att undersöka inverkan av olika strömtäthet vid elektroderna. Anläggningen uppdelades därför i tre delfält med sinsemellan olika elektrodtyper, nämligen 1" armeringsjärn (fält 1), 1 1/2" järnrör (fält 2) och 2 1/2" järn-

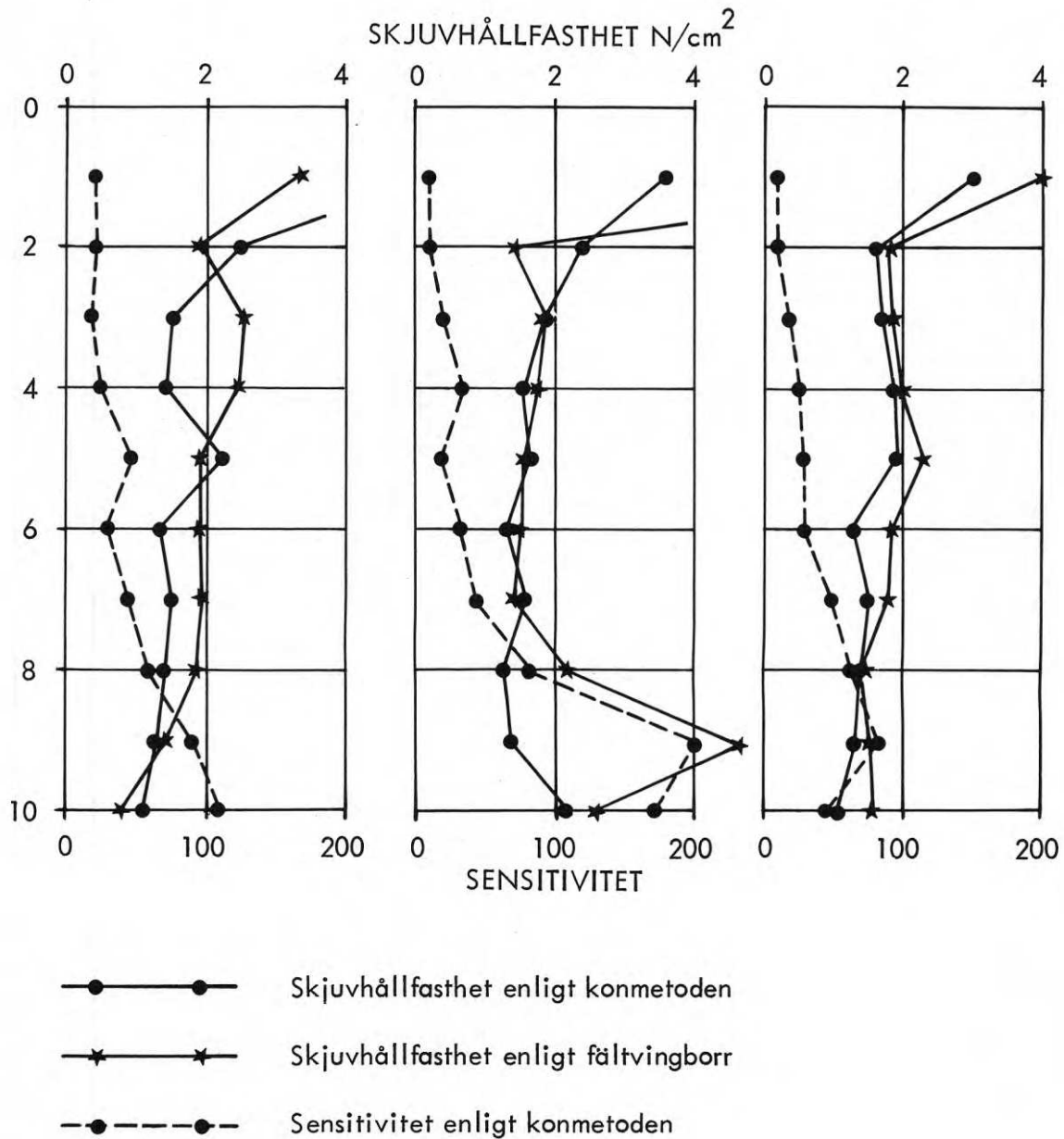


FIG. 8a. Geotekniska data för de tre provfälten. Provtagningen utförd före igångsättningen av elektroosmosen i mitten av vardera fältet i borrhöjningarna K10, K20, K30, FIG. 9.

Geotechnical data on clay for the three test fields. Sampling was carried out before the start of electro-osmosis in the centre of each field at points K10, K20 and K30 (FIG. 9).

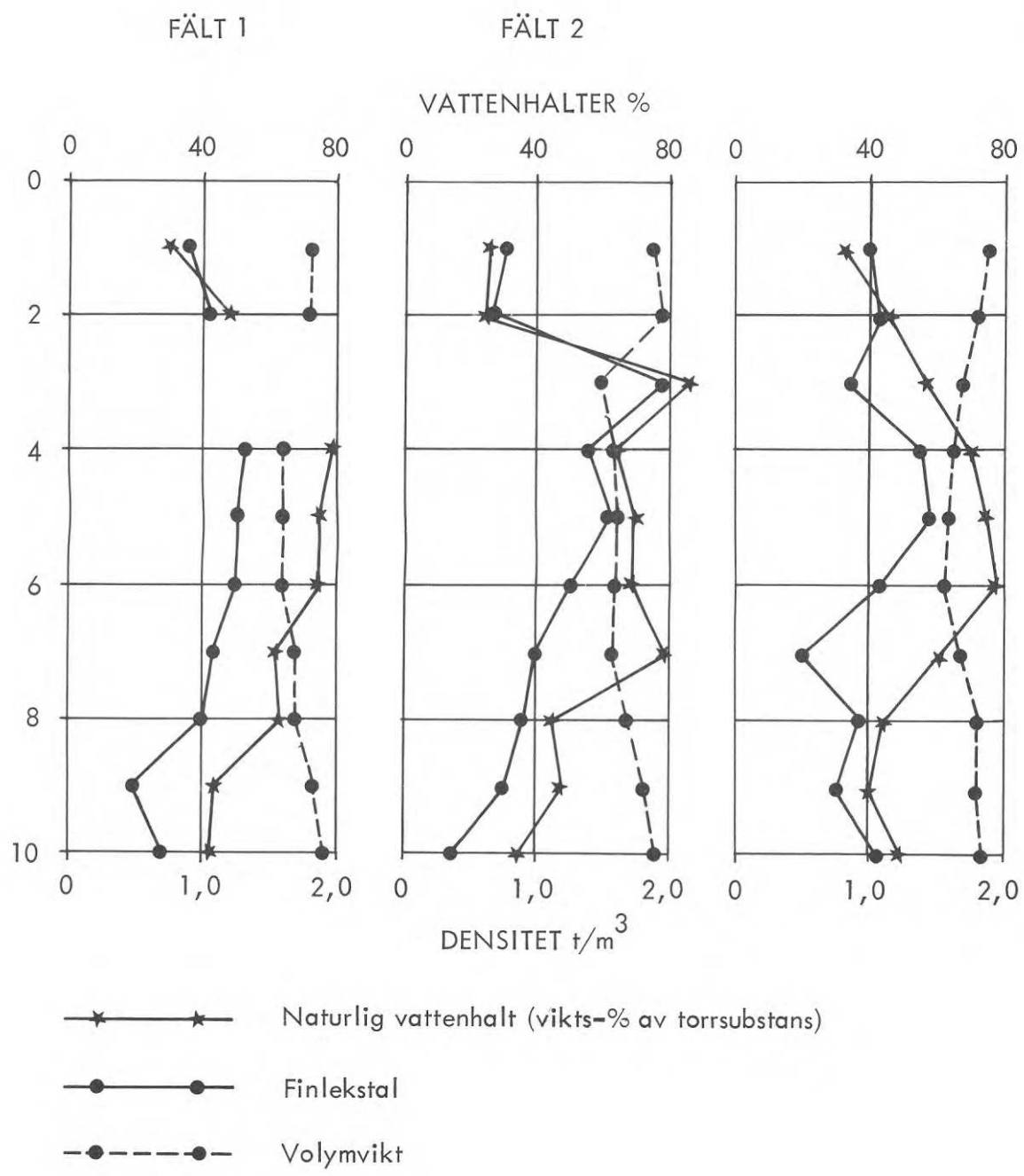


FIG. 8b. Geotekniska data för de tre provfälten. Provtagningen utförd före igångsättningen av elektroosmosen i mitten av vardera fältet i borrhöjningarna K10, K20, K30, FIG. 9.

Geotechnical data on clay for the three test fields. Samplings was carried out before the start of electro-osmosis in the centre of each field at points K10, K20 and K30 (FIG. 9).

rör (fält 3). Elektrodena placerades med samma inbördes avstånd i de tre fälten, nämligen i hörnpunkterna av liksidiga trianglar med sidan 2 m. Varje fält innehöll 3 anodrader med sammanlagt 18 anoder och 2 katodrader med sammanlagt 10 katoder. Elektrodslängden i jord var ca 10 m. Anläggningen visas i plan i FIG 9. Elektrodena installerades i juli-augusti 1965.

För att i detalj kunna studera effekterna av elektroosmosbehandlingen försågs mätfälten med omfattande mätutrustning för sättningsobservationer, portrycksobservationer och spänningsobservationer. Sättningsobservationerna utfördes genom detaljavgvägning av sättningsmätare, ursprungligen placerade på 0,5 och 5,0 m djup, men senare kompletterade med mätare på 2,5 och 7,5 m djup. I det sist utförda examensarbetet installerades också en bälgslangmätare av typ SGI (Wager). Portrycksobservationer utfördes på 5 m djup med mätare med slutet system av typ Wallgren. Spänningsfallet i jorden på 5 m djup mellan anod och katod uppmättes med voltmeter mellan plaströrsisolerade 16 mm armeringsjärn i ett flertal punkter. För anläggningens drift installerades i mars 1966 en likströmsomformare, dimensionerad för en maximal strömstyrka av 85 A vid +30°C lufttemperatur.

3.3 Den elektriska behandlingen

Elektroosmosanläggningen togs i bruk den 30 mars 1966. Det första examensarbetet utfördes av teknologerna Bengt och Rolf Andersson, Gunnar Sigvardsson samt Arne Wallstedt med samtliga tre fält inkopplade parallellt under tiden 30 mars - 4 juli 1966. Det andra examensarbetet utfördes av teknologerna Lennart Boox och Lars Rudsander med samtliga tre fält inkopplade parallellt under tiden 4 juli - 1 augusti 1966, och senare, under tiden 1 augusti - 1 november 1966, med endast fält 1 inkopplat (elektroder av 1" armeringsjärn). Det tredje examensarbetet utfördes av teknologerna Per-Göran och Roland Persson med endast fält 3 (elektroder av 2 1/2" rör) inkopplat under tiden 1 november 1966 - 1 mars 1967. Det fjärde examensarbetet, slutligen, utfördes av teknologerna Evert Friberg och Torbjörn Olsson med endast fält 2

(elektroder av 1 1/2" rör) inkopplat under tiden 13 juni - 22 augusti 1967.

Under pågående försök inträffade av olika anledningar då och då driftavbrott. För att kunna kontrollera energiåtgången var det därför nödvändigt att installera en kWh-mätare. Installationen utfördes först 173 dygn efter start (16 augusti 1966) under andra examensarbetet. Den i FIG 10 och 11 angivna energiförbrukningen fram till dygn 173 är således inte helt tillförlitlig. Fram till dygn 124 (1 augusti 1966), då alla försöksfält var inkopplade parallellt, måste vidare energiförbrukningen i vardera av de tre fälten uppskattas på basis av ekv (6). Energiförbrukningen har beräknats under antagande av att jorden i de tre fälten har samma elektroosmotiska egenskaper och att resistansen i jorden kan försummas vid sidan av övergångsresistansen mellan elektrod och jord. Man erhåller sålunda ett resistansförhållande mellan fält 1, 2 och 3 av respektive 1 : 0,97 : 0,93, d v s ett strömstyrkeförhållande av 1 : 1,03 : 1,08. Den med kWh-mätaren avlästa energiförbrukningen avser totala energin, alltså också energiåtgången i likströmsomformaren. För att kontrollera förlusterna i omformaren gjordes hela tiden kontinuerliga avläsningar av den till fälten direkt utgående strömmens styrka och spänning. Energiförlusterna i omformaren visade sig variera mellan i medeltal 39 % under andra examensarbetet, 46 % under tredje examensarbetet och ca 27 % under fjärde examensarbetet, räknat på total energi. (Variationen i verkningsgrad beror på att utnyttjningsgraden för likströmsomformaren var olika. Verkningsgraden försämras sålunda med minskande utnyttjningsgrad).

3.4 Uppmätta sättningar

De uppmätta medelsättningarna på 5 m djup inom de tre fälten redovisas i FIG 10 och 11 som funktion av tillförd elmängd och elektrisk energimängd.

Sättningen på 0,5 och 5,0 m djup tvärs över fälten exemplifieras i FIG 12. Man finner av figuren att elektroosmosen medfört en

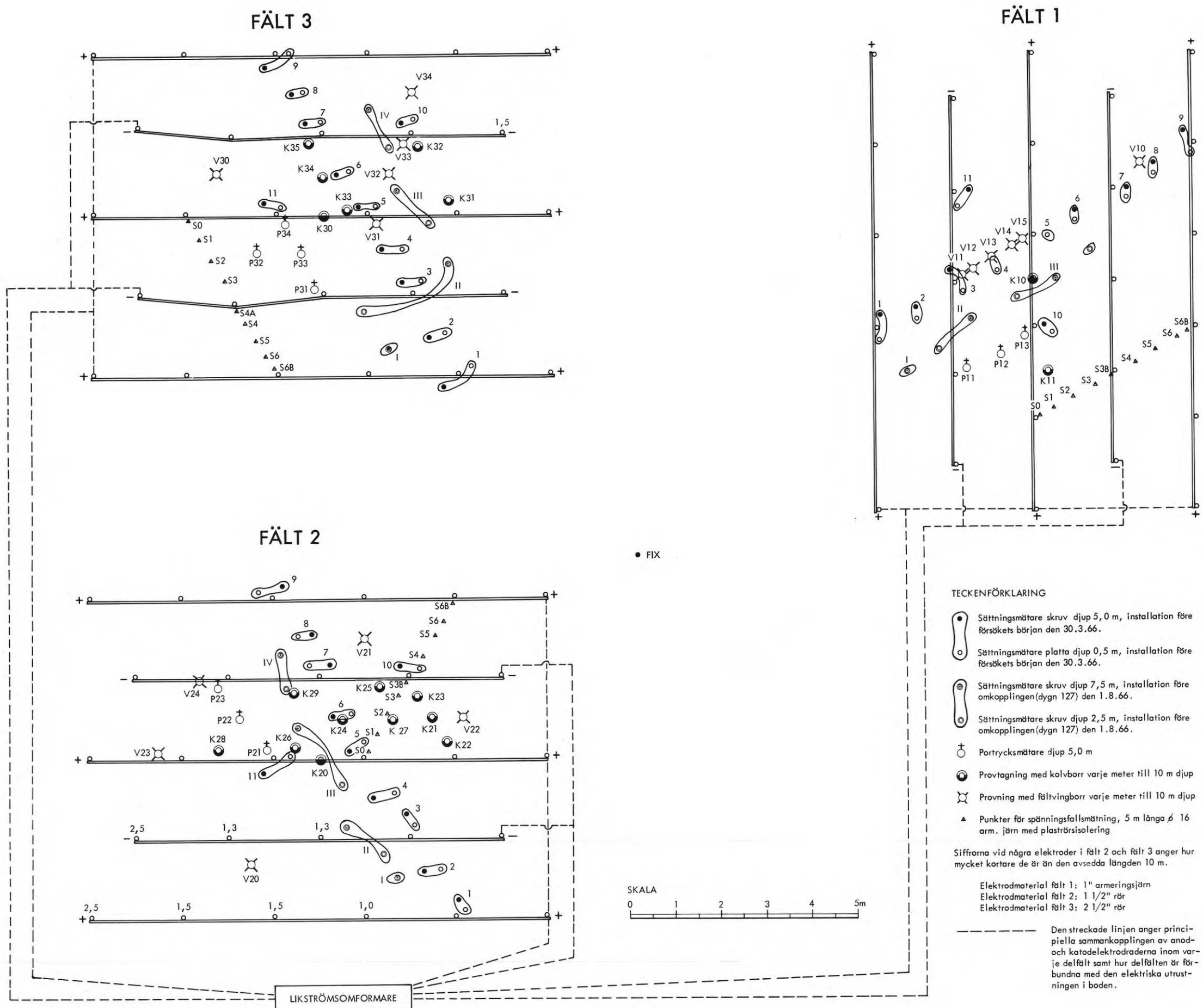


FIG. 9. Plan över elektroosmosfälten och installerade mätanordningar. Samtliga undersökningspunkter har redovisats med nummer löpande i tidföljd.

Plan of electro-osmosis fields and measuring equipment. All points of investigation are numbered in consecutive order with reference to time of investigation.

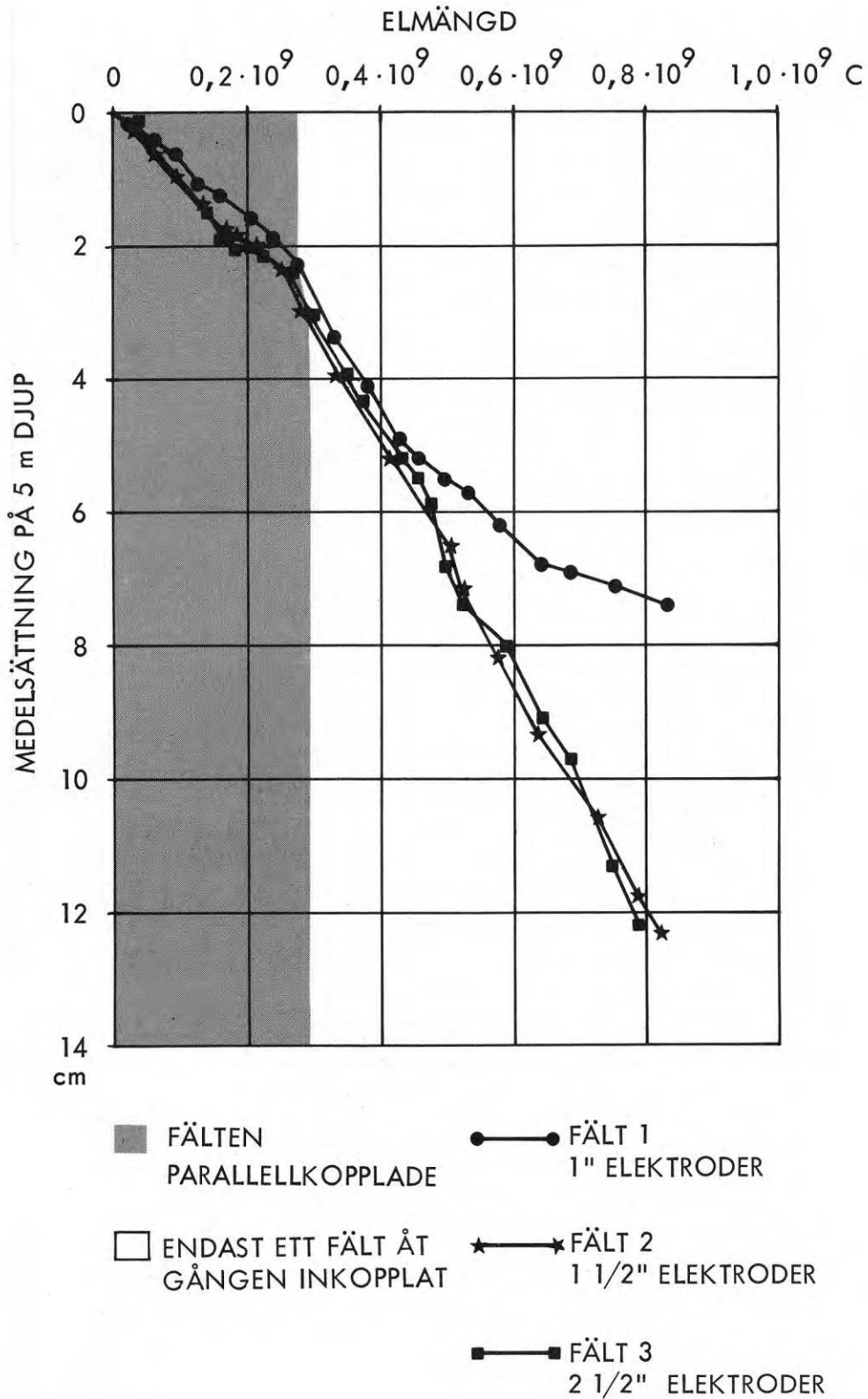


FIG. 10. Medelsättning på 5 m djup uppmätt som funktion av tillförd elmängd. I fält 1 med 1" elektroder har som framgår en markant effektminskning inträffat efter en förbrukad elmängd av $0,43 \cdot 10^9$ C.

Average settlement at a depth of 5 m below ground surface measured as function of electric current consumed. In field 1 with 1 in. electrodes a significant decrease in efficiency has occurred after a current consumption of $0.43 \cdot 10^9$ C.

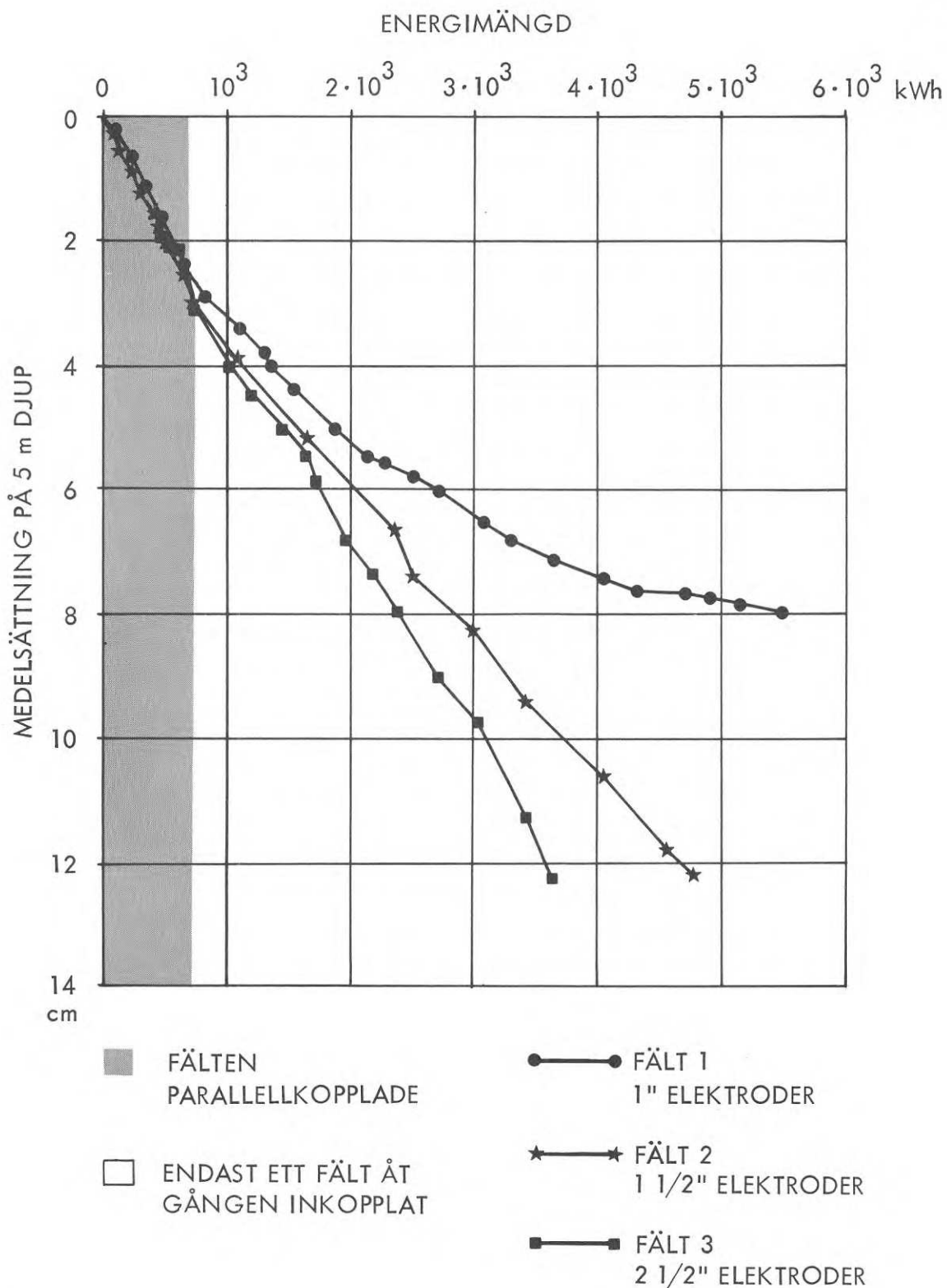


FIG. 11. Medelsättning på 5 m djup uppmätt som funktion av tillförd elektrisk energi. I fält 1 har som framgår energiförbrukningen per cm sättning ökat markant vid 2,1 MWh.

Average settlement at a depth of 5 m below ground surface measured as function of electric energy input. In field 1 the energy required per cm of settlement has increased significantly at 2.1 MWh.

resultaterande svällning av jorden mellan 0,5 och 5 m djup, speciellt inom fält 3. Då detta förhållande syntes märkligt och gav misstankar om något systematiskt fel, nedsattes den tidigare omtalade bälgslangmätaren i försöksfält 2 för att närmare studera svällning och kompression genom hela lerprofilen. Resultaten av denna undersökning visas i FIG 13. Den största kompressionen inträffar som synes mellan ca 5,3 och 7,4 m djup, medan en svällning har observerats mellan ca 2,3 och 3,3 m djup. Den direkta avvägningen av markytan har emellertid gett större sättning än mätningarna med bälgslang. Skillnaden uppgår till ca 2 cm. Förklaringen till denna skillnad är med största sannolikhet att slangen vid monteringen varit för hårt sträckt och att därför en tidsbunden förkortning av slangen inträffat, vilken saknar samband med de elektroosmotiska effekterna. Genom slangens egen vikt och en bättre anliggnings mot jorden på större djup kan man med goda skäl anta att denna krypning i slangen gjort sig mest märkbar närmast markytan. Man kan alltså förmoda att svällningen i de övre jordlagren varit mera omfattande än figuren visar, vilket också bestyrks av de övriga mätningarna.

Förklaringen till den inträffade svällningen har efter försök i elektroödometer visat sig ligga i gasbildning. Som framgår av FIG 15 är den gasvolym som bildas i det övre lerlagret under elektroosmosbehandlingen större än den borttransporterade vattenvolymen, räknat per coulomb. Gasbildningen är speciellt kraftig i de prover som innehåller snäckskal - t o m så kraftig att den elektroosmotiska permeabilitetskoefficienten närmat sig värdet noll, FIG 14. I fält 3, där den största svällningen av det övre lerlagret konstaterats, FIG 12, kunde man även i naturen iaktta kraftig gasutveckling vid katoderna, FIG 16.

Någon märkbar skillnad i sättningshastighet vid anod och katod kan inte observeras, trots vattentransporten mot katoden. Sättningarna begränsas som synes inte bara till området innanför elektroosmosfältet. Hur långt verkan sträcker sig utanför går emellertid inte att avgöra på basis av de gjorda mätningarna.

Som framgår av FIG 10 har sättningarna i fält 2 och 3 under hela försöket utbildats i direkt proportion mot elmängden i överens-

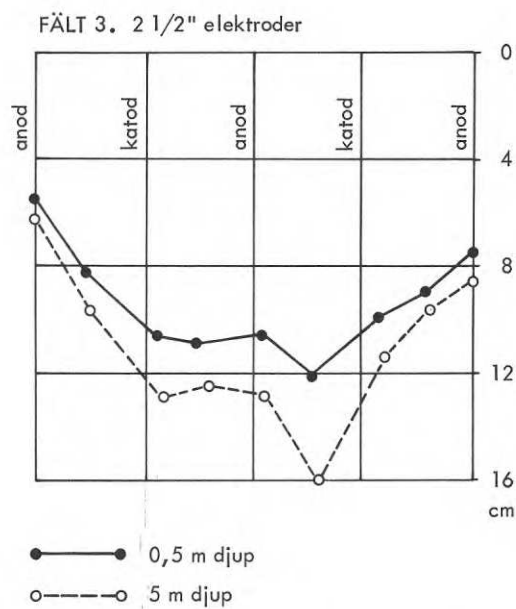
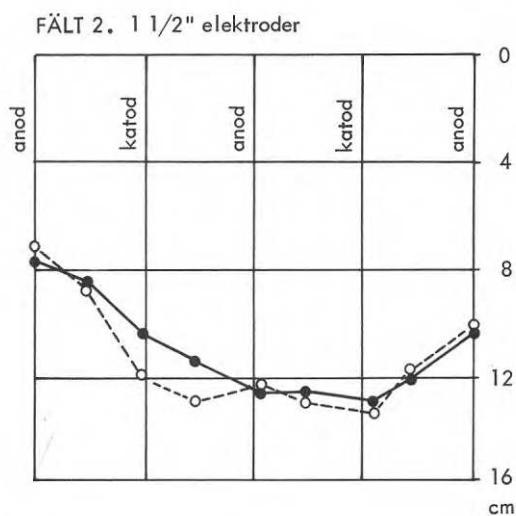
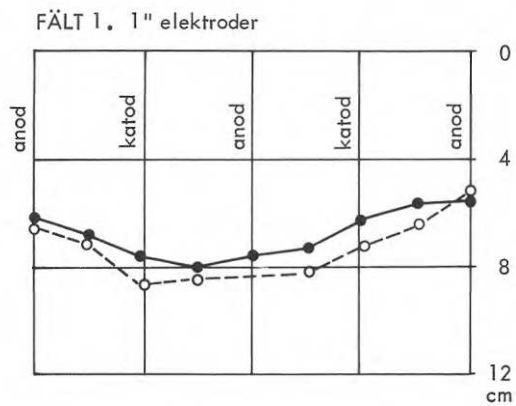


FIG. 12. Sättningsprofiler genom försöksfälten för 0,5 och 5,0 m djup efter de i FIGUR 10-11 angivna maximalt tillförda elmängderna och energiförbrukningarna.

Settlement profiles through test fields at depths of 0.5 and 5.0 m below ground surface measured at times of maximum consumption of current and energy given in FIGS. 10-11.

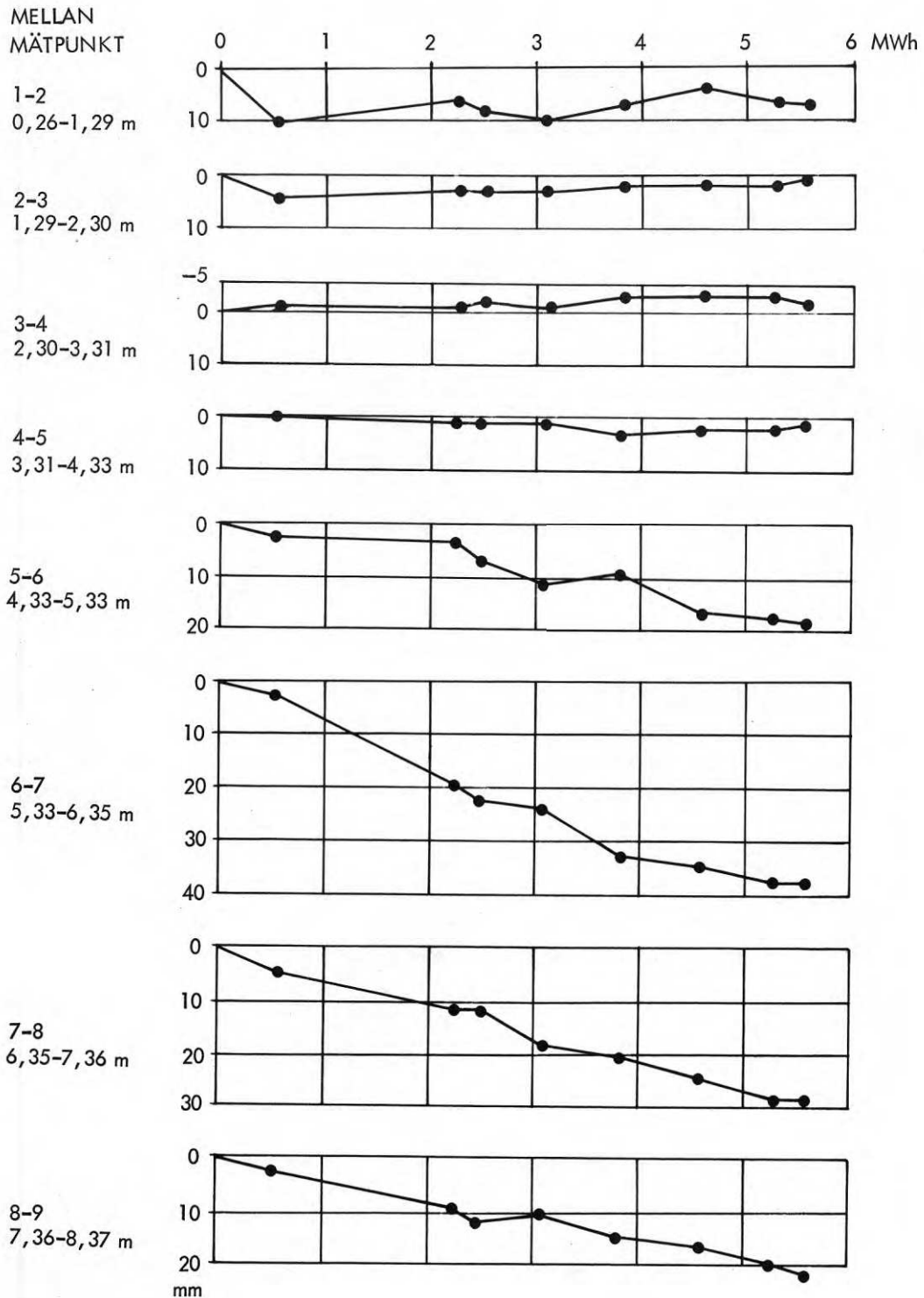


FIG. 13. Resultat av kontrollmätning med bälgslangmätare, typ Wager. Mätningen visar att svällning med säkerhet ägt rum i jorden från 2,3 till 3,3 m djup, eventuellt ned till 4,3 m djup.

Results of checking measurements with "folding-tube", settlement meter, Wager type. The measurements show that swelling has undoubtedly occurred in the soil from a depth of 2.3 to 3.3 m, possibly down to a depth of 4.3 m.

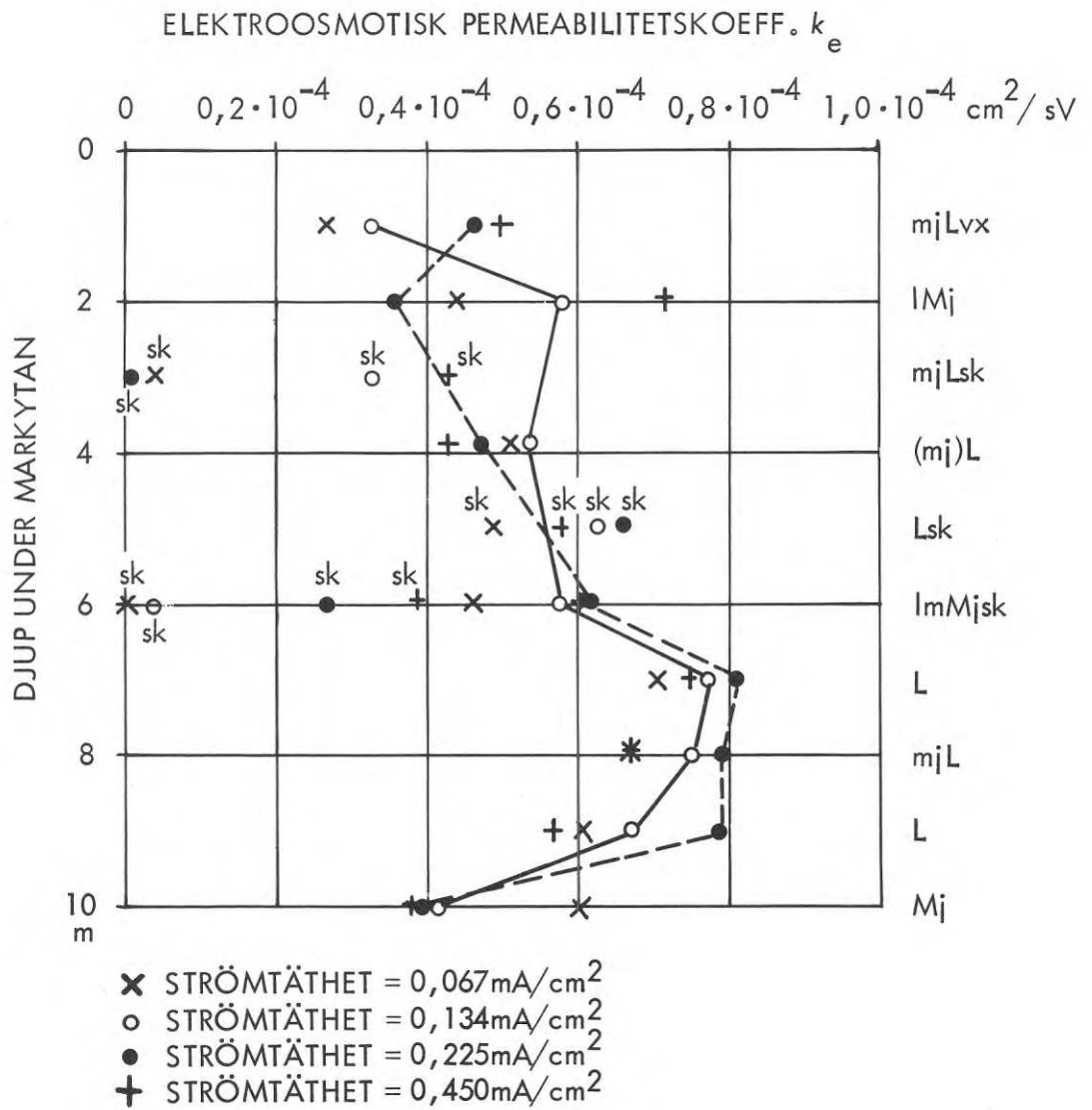


FIG. 14. Elektroosmotisk permeabilitetskoefficient, uppmätt med elektroödometer på prover tagna ca 60 m nordväst om försöksfälten. Bestämningen har utförts med varierande elströmtäthet, vald med hänsyn till förhållandena i fält. Den streckade och heldragna kurvan torde i stort sett representera fältförhållandena då endast ett fält var inkopplat. Under försöket har provet utsatts för samma effektiva överlagringstryck som i naturligt tillstånd.

Electro-osmotic permeability measured in electro-oedometer on samples taken about 60 m NW of test fields. The measurements were carried out with different current densities chosen with respect to field conditions. The broken and full-line curves represent in broad outline the field conditions when voltage was applied to only one field at a time. During the test the samples were subjected to the same effective over-burden pressure as in natural conditions.

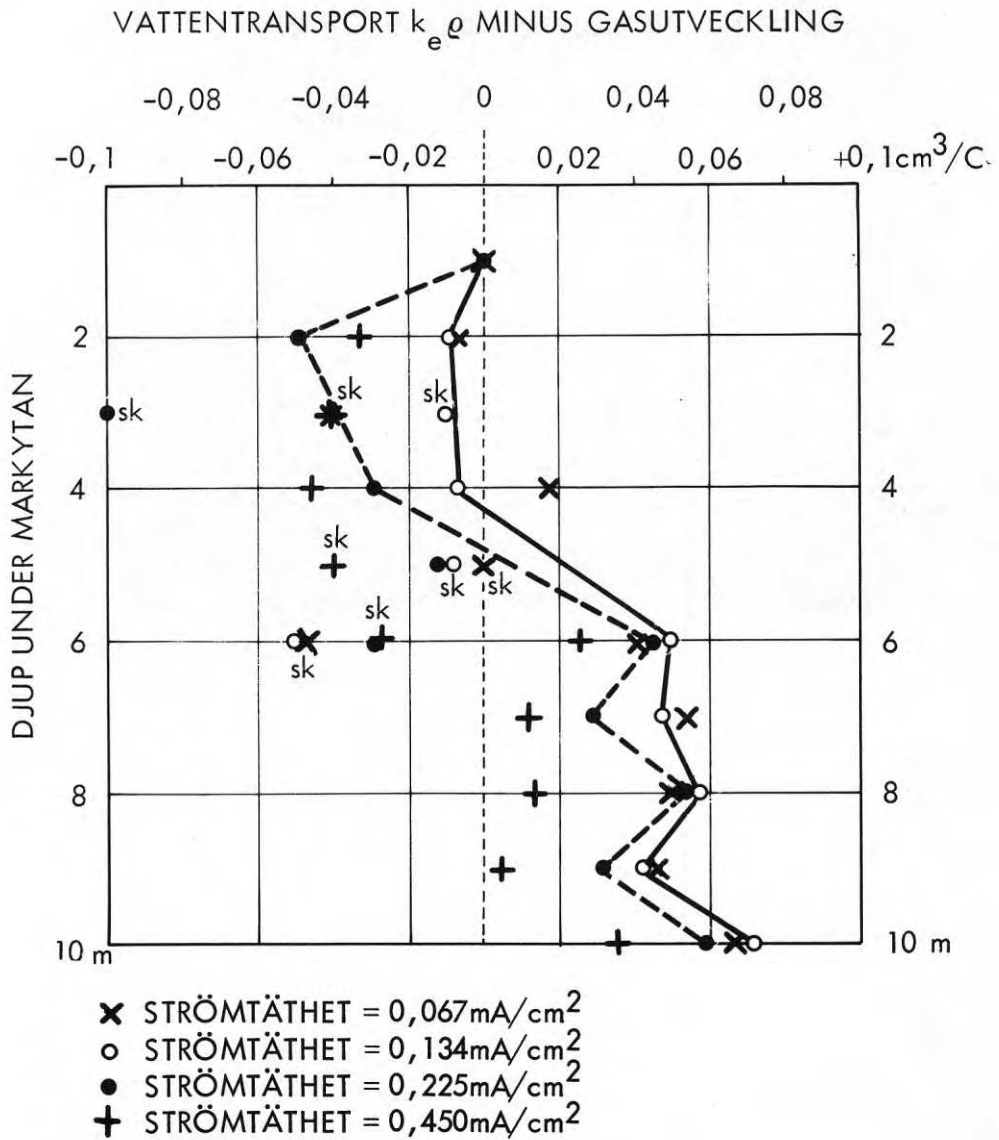


FIG. 15. Vattentransport minus gasutveckling uppmätt med elektroödometer på samma prover som i FIGUR 14. De streckade och heldragna linjerna representerar strömtätheterna i stort då endast ett fält var inkopplat (jämför FIGUR 14).

Water flow minus gas generation measured in electrooedometer on same samples as in FIG. 14. The broken and full-line curves represent in broad outline the current densities when voltage was applied to only one field at a time.



FIG. 16. Gasutvecklingen vid katoderna var kraftig, speciellt i fält 3 som visas här. Förutom gasutvecklingen visar bilden att det tillströmmande vattnet gjort marken intill katoderna sank och att salter utfällts på katodytan. Intill anoderna var marken torr och fast.

The gas evolution was strong at the cathodes, particularly in field 3 as shown here. It can also be observed that inflow of water has made the ground around the cathodes watery and that salt has been precipitated on the cathode surface. The ground around the anodes was dry and hard.

stämmelse med ekv. (4). I fält 1 däremot har från ca 160:e dygnet, d v s efter en förbrukad elmängd av $0,43 \cdot 10^9$ C och en effektiv energiförbrukning av ca 2,1 kWh, FIG 10-11 (totalt inklusive omformaren 3,6 kWh), en markant ökning inträffat i såväl förbrukad elmängd som energi per cm sättning.

Den större *elmängden* per cm sättning tyder på att elströmmen genom det övre, för elektroosmotisk avvattning mindre lämpade lerlagret ner till 5 m djup successivt ökat på bekostnad av det undre lerlagret, möjligen beroende på att några av anoderna korroderats av i snitt med stor elavgång. Den större *energiförbrukningen* per cm sättning följer bl a av att den erforderliga spänningen för bibehållande av strömstyrkan successivt ökar vilket i sin tur beror på ökande övergångsmotstånd vid anoderna. Denna ökning kan uppkomma genom att några anoder korroderats av, såsom här påpekats, men också genom den ökade strömtäthet vid anoderna som följer av en gradvis reducerad mantelyta.

Bortser man från tiden efter 160:e dygnet i fält 1 finner man att den erhållna volymminskningen av jorden under djupet 5 m är 0,007 à 0,008 cm^3/C vid strömstyrkan ca 30 A/fält och 0,014 à 0,015 cm^3/C vid strömstyrkan ca 90 A/fält, där de lägre värdena avser fält 1 och de högre fält 2 och 3. Volymberäkningen har härvid gjorts under antagande att den i FIG 10 och 11 visade medelsättningen inträffat på ytan $80 \text{ m}^2/\text{fält}$, vilket antagande givetvis är förhållandevis osäkert.

3.5 Inverkan på lerans egenskaper

Inverkan av elektroosmosen undersöktes med avseende på lerans skjuvhållfasthet, sensitivitet, vattenhalt, finlekstal och konsolideringsegenskaper. Med hänsyn till den stora arbetsinsats som krävs för dylika undersökningar har tyvärr antalet undersökningspunkter blivit alltför få för att ge tillräckligt statistiskt underlag. Vid analys av försöksresultaten måste man därför beakta den naturliga spridning av försöksvärdena som är regel i våra svenska leror.

Före elektroosmosförsöken gjordes bestämning av *skjuvhållfastheten* i varje försöksfält, dels med fältvingborr, dels med fallkonförsök på prover upptagna med standardkolvborr. Om man som representativa genomsnittsvärden för lerprofilen väljer medelvärdet av kon- och vingborrförsök, erhålls $\tau_f = 2,4 \text{ N/cm}^2$ i fält 1, $2,3 \text{ N/cm}^2$ i fält 2 och $2,1 \text{ N/cm}^2$ i fält 3 från 1 till 5 djup samt $\tau_f = 1,7 \text{ N/cm}^2$ i fält 1, $1,8 \text{ N/cm}^2$ i fält 2 och $1,6 \text{ N/cm}^2$ i fält 3 från 5 till 10 m djup. Jämförs dessa värden med på motsvarande sätt framräknade värden efter elektroosmosförsökens avslutning (i fält 1 endast vingborrvärden) erhålls följande ungefärliga förändringar i odränerad skjuvhållfasthet $\Delta\tau_f/\tau_f$:

	0,5 m från anod	Mitt emellan anod och katod	0,5 m från katod
<u>1 - 5 m djup</u>			
fält 1	+10 %	+ 5 %	-20 %
fält 2	+10 %	-20 %	-25 %
fält 3	+25 %	-20 %	-30 %
<u>5 - 10 m djup</u>			
fält 1	+30 %	+ 5 %	0 %
fält 2	+10 %	-20 %	-15 %
fält 3	+80 %	+10 %	-25 %

I försöksfält 1 undersöktes skjuvhållfastheten efter elektroosmosen med fältvingborr i fem borrhål mellan anod och katod. Resultatet av denna undersökning jämfört med ursprunglig skjuvhållfasthet enligt fältvingborr i fält 1 redovisas i FIG 17. Skjuvhållfastheten har som synes förbättrats utom närmast katoden på de flesta undersökta nivåer. Någon förklaring till varför man erhållit gynnsammare resultat i fält 1 än i övriga kan inte ges. Sannolikt får man hänföra resultatet till normal spridning i försöksvärden.

Förändringarna i skjuvhållfasthet vid första examensarbetets avslutning, när samtliga försöksfält varit inkopplade i 115 dygn, uppmättes med konförsök på prover tagna med standardkolvborr till följande medelvärden för lerprofilen:

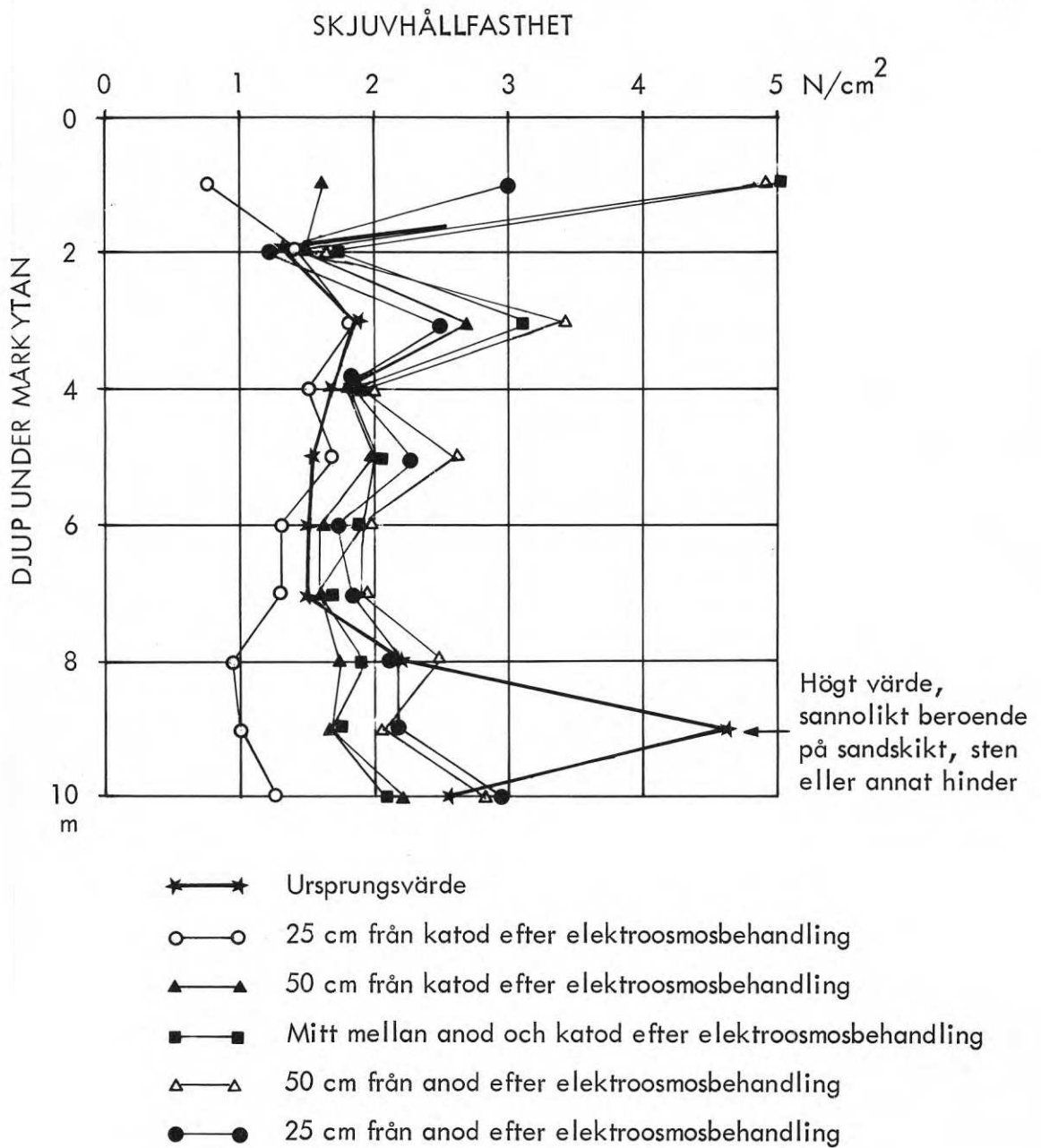


FIG. 17. Skjuvhållfasthet bestämd med fältvingborr i fält 1 (FIGUR 9) före och efter elektroosmosbehandlingen.

Shearing strength in field 1 determined by field vane tests before and after electro-osmosis treatment.

	Intill anod	Mitt emellan anod och katod	Intill katod
<u>1 - 5 m djup</u>			
fält 2	+10 %	-20 %	-
fält 3	-15 %	-	-30 %
<u>5 - 10 m djup</u>			
fält 2	+10 %	-20 %	-
fält 3	+20 %	-	-20 %

I fält 2 och 3 skulle man alltså under tiden efter dygn 115 endast fått en markant ökning av skjuvhållfastheten intill anoderna i fält 3. Resultatet kan emellertid vara missvisande på grund av den naturliga spridningen i försöksvärdena.

Sensitiviteten S_t hos leran uppmättes från början genom konförsök till i medeltal 27 i fält 1, 18 i fält 2 och 20 i fält 3 från 1 till 5 m djup samt till 63 i fält 1, 82 i fält 2 och 55 i fält 3 från 5 till 10 m djup. Förändringarna i procent av ursprunglig sensitivitet $\Delta S_t/S_t$ till följd av elektroosmos uppmättes efter försökens avslutning till följande värden:

	Intill anod	Mitt emellan anod och katod	Intill katod
<u>1 - 5 m djup</u>			
fält 2	+28 %	+55 %	> +210 %
fält 3	- 5 %	-38 %	+ 60 %
<u>5 - 10 m djup</u>			
fält 2	+ 4 %	> +46 %	> + 51 %
fält 3	-71 %	-67 %	0 %

En jämförelse mellan sensitivitetsvariationerna längs två lerprofiler intill katoderna i fält 2 och 3 före och efter försöket görs i FIG 18.

Det enda man med säkerhet kan säga med hänsyn till de stora variationerna inom området är att sensitiviteten intill katoderna i medeltal har ökat. Trots ökningen har de högsta uppmätta värdena likväl gått ned i fält 2 från maximalt 200 före elektroos-

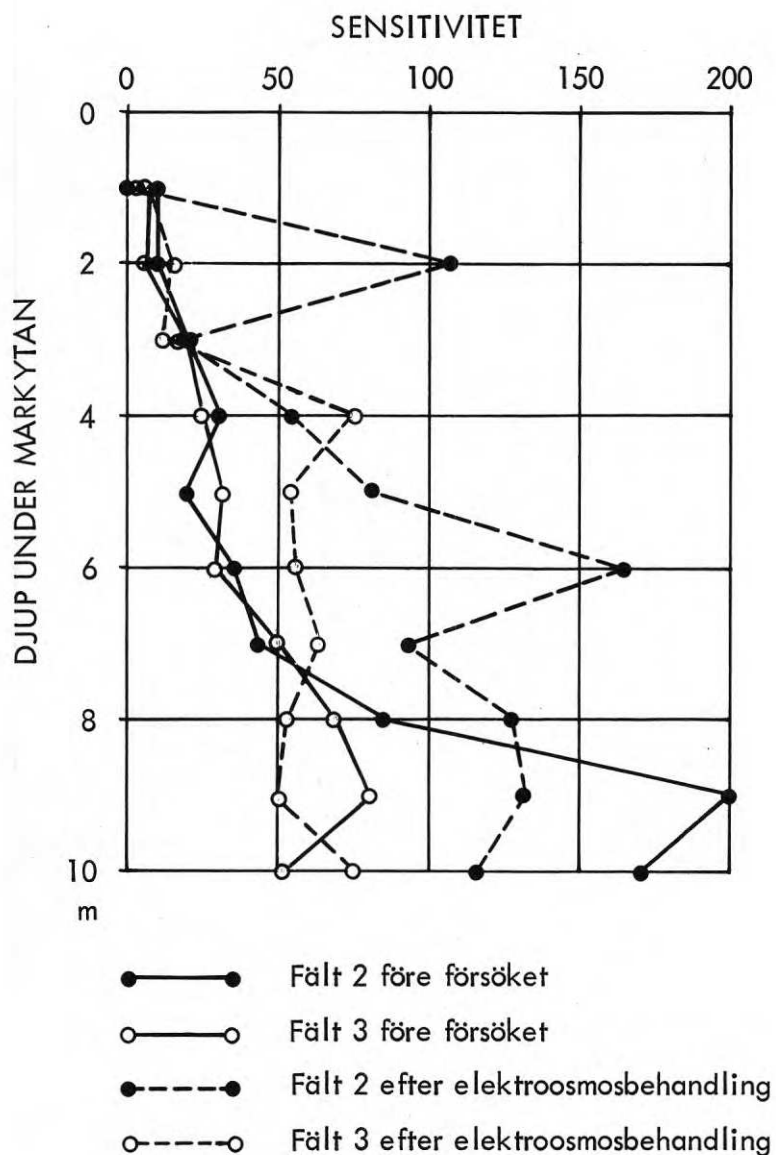


FIG. 18. Sensitivitetsvärden uppmätta intill katoderna i fält 2 och 3 efter elektroosmosbehandlingen jämfört med värdena före försöket. Bestämningen utförd med konprov.

Sensitivity values measured at the cathodes in fields 2 and 3 after electro-osmosis treatment as compared with corresponding values before treatment. Sensitivity determined by fall-cone tests.

mosen. Vid en provtagning under pågående elektroosmos uppmättes emellertid på 5 m djup i fält 3 värdet 250. Ökningen i sensitivitet intill katoderna överensstämmer med resultatet från Scania Vabis i Södertälje.

Den konstaterade genomgående ökningen av medelsensitiviteten i fält 2 är märklig med hänsyn till den redan från början höga sensitiviteten, liksom den stora minskningen i medelsensitivitet i fält 3 (utom närmast katoderna) är svårförståelig med hänsyn till den redan från början relativt låga sensitiviteten. Detta förhållande motsäger misstanken om att resultatet enbart skulle vara en följd av den naturliga spridningen av försöksvärdena.

Vattenhalten w hos leran uppmättes före försöket till i medeltal 57,0 % i fält 2 och 57,8 % i fält 3 från 1 till 5 m djup samt till 59,6 % i fält 2 och 58,0 % i fält 3 från 5 till 10 m djup.

Elektroosmosen medförde här följande förändringar i vattenhalt Δw :

	Intill anod	Mitt emellan anod och katod	Intill katod
<u>1 - 5 m djup</u>			
fält 2	-2,3 %	+1,0 %	+ 4,7 %
fält 3	-8,8 %	-5,8 %	-11,3 %
<u>5 - 10 m djup</u>			
fält 2	-8,8 %	-8,0 %	-7,0 %
fält 3	-8,6 %	-7,4 %	+1,8 %

Detta ger i medeltal från 1 till 5 m djup 1,1 % ökning av vattenhalten i fält 2 och 8,6 % minskning i fält 3. Från 5 till 10 m djup erhålls i medeltal 7,9 % minskning av vattenhalten i fält 2 och 4,7 % minskning i fält 3.

Man får genom detta enligt ekv. (8) för lerlagret mellan 1 och 5 m djup en svällning av 5 cm i fält 2 och en kompression av 36 cm i fält 3. För lerlagret mellan 5 och 10 m djup fås en kompression av 41 cm i fält 2 och en kompression av 25 cm i fält 3. Vattenhaltsändringen skulle alltså ge en total marksätt-

ning av ca 36 cm i fält 2 och 61 cm i fält 3, medan den uppmätta sättningen är ca 12 cm i fält 2 och 12 cm i fält 3.

Den stora skillnaden mellan värdena kan ha två orsaker. Dels kan de ursprungliga vattenhalterna vara missvisande (endast 1 borrhål i varje fält) och följaktligen ge en skev bild av vattenhaltsminskningen; dels ger den gasbildning i jorden, som bevisligen ägt rum under elektroosmosbehandlingen, upphov till en svällning som motverkar komprimeringen genom avvattning.

Finlekstalet w_F hos leran uppmättes före försöket till i medeltal 52,8 % i fält 2 och 45,3 % i fält 3 från 1 till 5 m djup samt till 39,6 % i fält 2 och 36,2 % i fält 3 från 5 till 10 m djup. Elektroosmosen medförde följande förändringar Δw_F :

	Intill anod	Mitt emellan anod och katod	Intill katod
<u>1 - 5 m djup</u>			
fält 2	- 6,5 %	- 6,3 %	-11,3 %
fält 3	+ 0,7 %	+ 3,2 %	- 3,3 %
<u>5 - 10 m djup</u>			
fält 2	- 4,2 %	- 3,6 %	- 8,0 %
fält 3	+13,5 %	+12,4 %	+ 8,0 %

Resultatet visar att finlekstalet till följd av elektrofores blir lägst vid katoden. Värdena vid anod är i genomsnitt något lägre än värdena mellan anod och katod, men kan med hänsyn till den naturliga spridningen inte anses ge en klar tendens. Relationen mellan värdena före och efter elektroosmosförsöket i de två försöksfälten är motsägande, vilket sannolikt beror på att utgångsvärdena i finlekstal inte är representativa för försöksfälten (som ovan nämnts endast 1 borrhål i varje fält).

Förkonsolideringstrycket hos leran har inte ändrats i sådan grad att någon entydig tendens kan läsas av. I vissa fall kan man läsa av en minskning, i andra en ökning, men resultaten ligger i stort sett inom den normala felmarginalen. Antalet ödometerförsök är dessutom så litet att man inte kan dra några säkra slutsatser.

För att uppnå största möjliga vattentransport i förhållande till använd elektrisk energi är det viktigt att övergångsresistansen vid elektroderna hålls nere och att den inte ökar alltför mycket med tiden. Möjligheterna till detta synes bl a bero på strömtätheten vid elektroderna. Enligt Fredén (1962) bör t ex strömtätheten vid anoderna inte överstiga 2 à 3 mA/cm² för att det från början erhållna spänningsfallet skall bli stationärt. Anoderna kan nämligen eljest bli så starkt upphettade att leran torkar ut. Därigenom ökar det elektriska ledningsmotståndet starkt och man får ett ökande potentialfall närmast anoden.

Problemet synes emellertid mer komplicerat än så. Enligt mätningarna i fält 1 har sålunda potentialfallet vid en strömtäthet av 1 mA/cm² ökat successivt under hela försökets gång vid anoderna, medan det minskat vid katoderna, se FIG 19 a-c. Till och med vid så låg strömtäthet som 0,3 mA/cm² har liknande resultat erhållits. I fält 2 och fält 3 synes däremot i stort sett stationärt tillstånd ha erhållits. I fält 3 har emellertid spänningsfallet mellan katodrad och yttre anodrad ändrats på ett oväntat sätt efter inkopplingen av enbart fält 3. Frågan om vilken strömtäthet som ger stationärt övergångsmotstånd vid elektroderna synes alltså hittills inte vara tillfredsställande besvarad.

Undersökningen visar att spänningsfallet närmast elektroderna varierar under försökets gång. Vid de strömstyrkor som här använts (ursprunglig strömtäthet < 1 mA/cm²) synes emellertid tillståndet i systemet som helhet kunna betraktas som stationärt. Därvid bortses givetvis från tiden efter det att anoderna mer eller mindre förbrukats.

3.7 Portryck

Mätningarna visar som väntat en minskning av portrycket intill anoderna och en ökning intill katoderna. I fält 2 och 3 synes vissa portrycksmätare inte ha fungerat tillfredsställande var-

Siffrorna på kurvorna anger tiden i dygn från elektrosmosförsökets början till resp. avläsningstillfälle. Tiden nollställd på nytt efter inkoppling av endast fält 1.

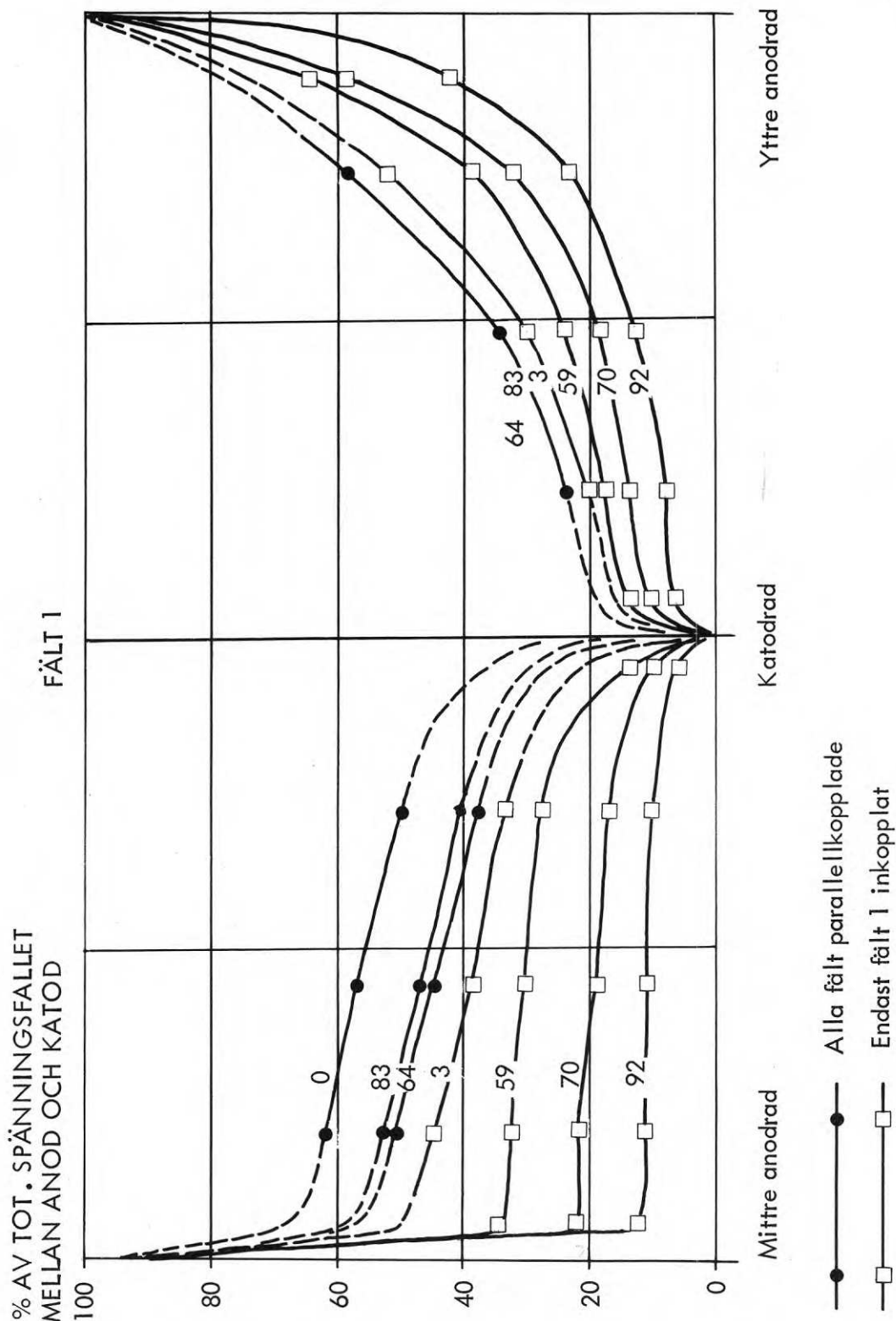


FIG. 19a. Spänningsfall mellan anod- och katodrad - mätt från anodraden i fältets mitt till den yttersta anodraden på 5 m djup under markytan - som funktion av tid och avstånd från elektroderna.

Potential gradient between anode and cathode rows, measured from the anode row in the centre of the field to the outermost anode row, as function of time and distance from electrodes.

Siffrorna på kurvorna anger tiden i dygn från elektrosmosförsökets början till resp. avläsningstillfälle. Tiden nollställd på nytt efter inkoppling av endast fält 2.

% AV TOT. SPÄNNINGSFALLET
MELLAN ANOD OCH KATOD

FÄLT 2

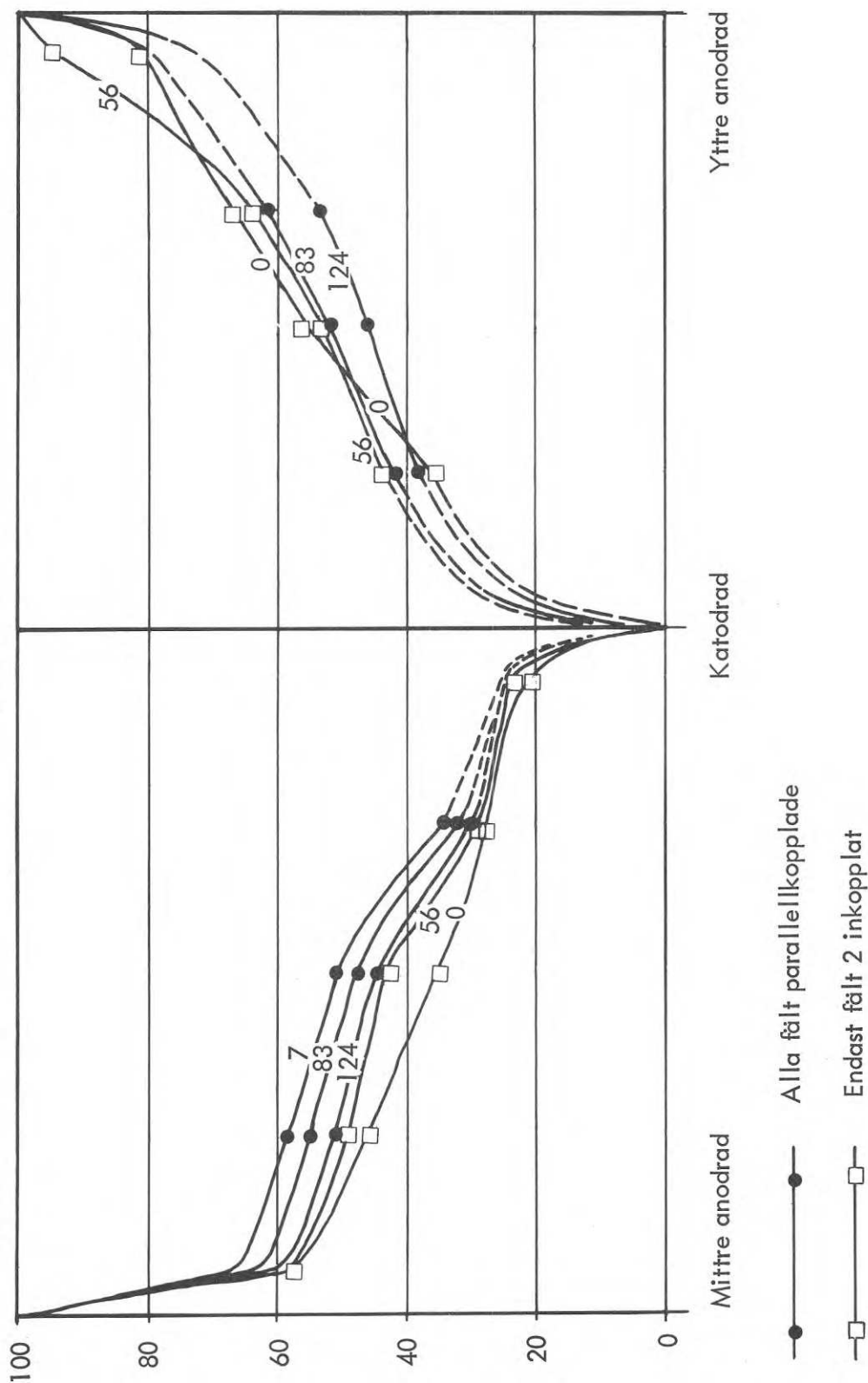
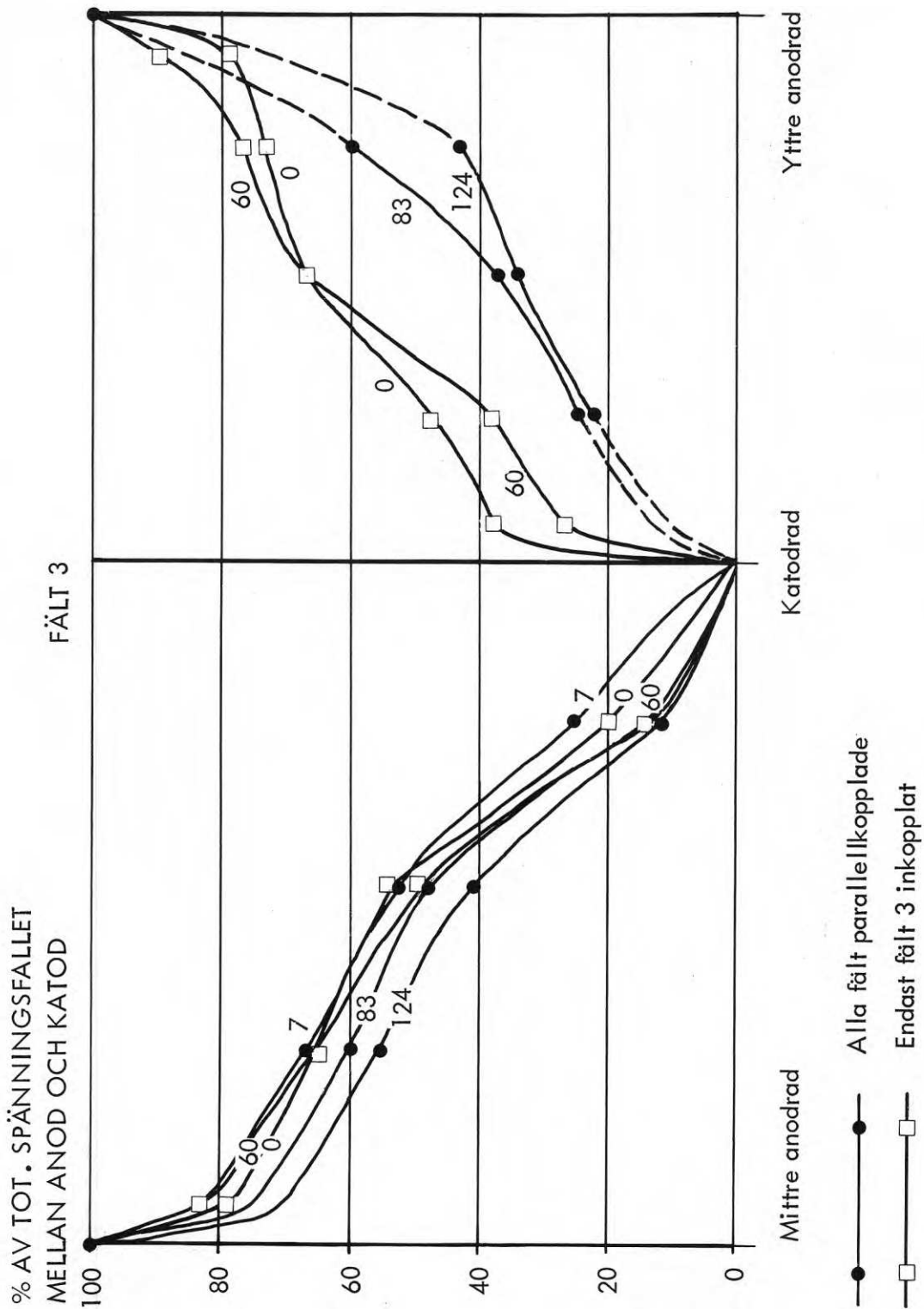


FIG. 19b. Spänningsfall mellan anod- och katodrad - mätt från anodraden i fältets mitt till den yttersta anodraden på 5 m djup under markytan - som funktion av tid och avstånd från elektroderna.

Potential gradient between anode and cathode rows, measured from the anode row in the centre of the field to the outermost anode row, as function of time and distance from electrodes.



Siffrorna på kurvorna anger tiden i dygn från elektroosforsökets början till resp. avläsningstillfälle. Tiden nollställd på nytt efter inkoppling av endast fält 3.

FIG. 19c. Spänningsfall mellan anod- och katodrad - mätt från anodraden i fältets mitt till den yttersta anodraden på 5 m djup under markytan - som funktion av tid och avstånd från elektroderna.

Potential gradient between anode and cathode rows, measured from the anode row in the centre of the field to the outermost anode row, as function of time and distance from electrodes.

för endast resultatet av portrycksmätningen i fält 1 redovisas, FIG 20. Inverkan på portrycket blev här störst omedelbart efter fränkopplingen av fält 2 och 3, när spänningen över fält 1 ökades från ca 8,5 V till ca 30 V. Den största portrycksminskningen, $3,5 \text{ N/cm}^2$, vid anoden och den största ökningen, $5,0 \text{ N/cm}^2$, vid katoden innebär en portrycksdifferens mellan anod och katod av $8,5 \text{ N/cm}^2$. Portrycksdifferensen mellan anod och katod har emellertid som synes utjämnats med tiden till ett i stort sett stationärt värde om $1,5 \text{ à } 2 \text{ N/cm}^2$. Även i fält 2 och 3 har portrycksdifferensen mellan anoder och katoder uppnått stationära värden om ca $1,5 \text{ à } 2 \text{ N/cm}^2$ och elektroddiametern synes alltså här inte ha haft någon påtaglig inverkan.

3.8 Kontroll av beräkningsmetoder

Motstånd i det elektriska fältet

Under det första examensarbetet och i början av det andra var som nämnts de tre försöksfälten parallellkopplade. För att därvid upprätthålla en total medelströmstyrka om 85 A krävdes en elektrisk spänning av 7 - 10 V, i medeltal ca 8,5 V.

Om man som första ansats, liksom i exemplet Scania Vabis, försummar jordresistansen vid sidan av övergångsresistansen mellan elektroder och jord, erhålls enligt ekv. (5) och (6) för fält 1

$$R_{\text{tot}} = 0,316\rho \cdot 10^{-3} \Omega,$$

för fält 2

$$R_{\text{tot}} = 0,304\rho \cdot 10^{-3} \Omega$$

och för fält 3

$$R_{\text{tot}} = 0,294\rho \cdot 10^{-3} \Omega$$

där ρ = resistiviteten i jord i Ωcm . Vid parallellkoppling av fälten ger dessa värden det totala motståndet:

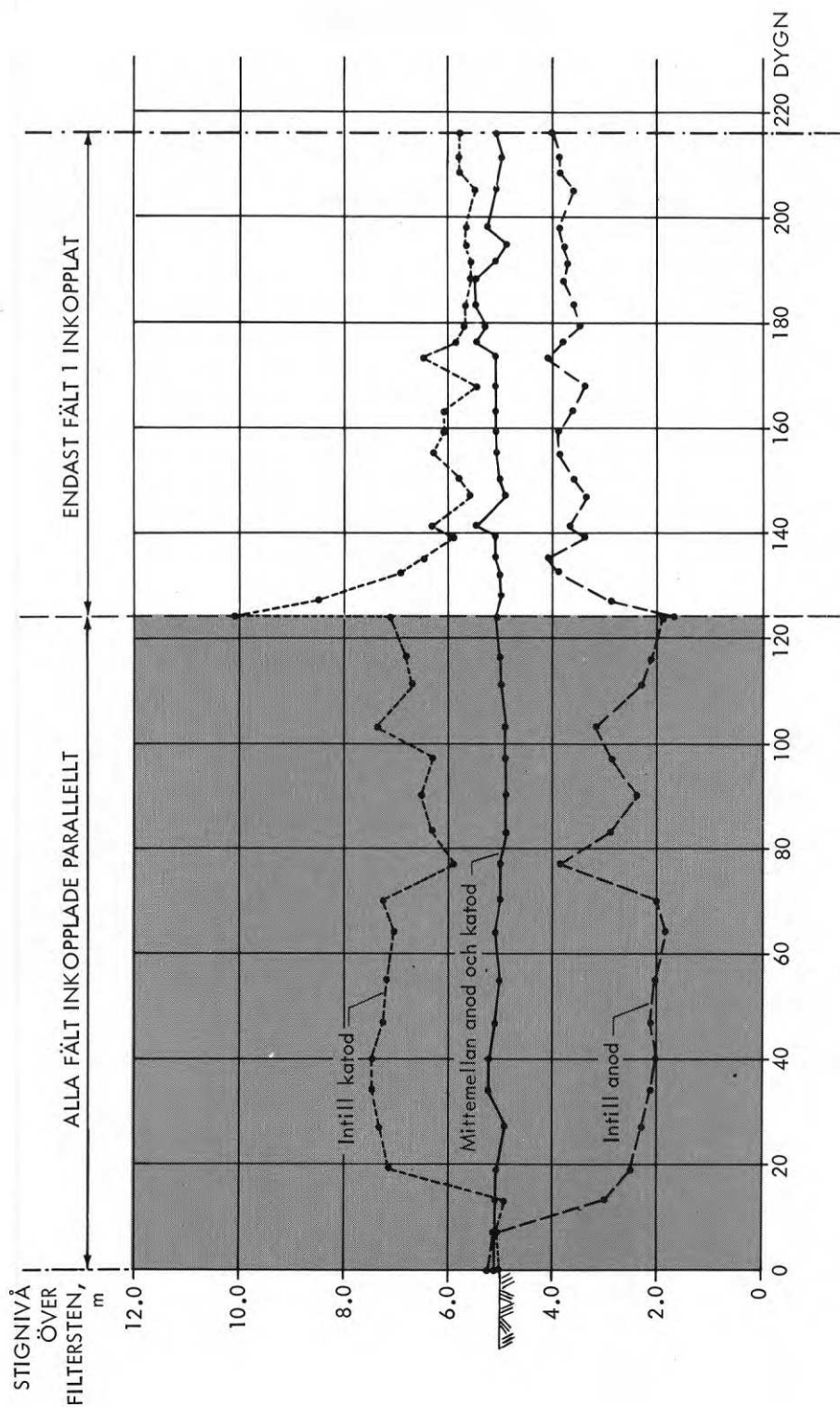


FIG. 20. Elektroosmosens inverkan på porvattentrycket, uppmätt i fält 1 (1" elektroder) som funktion av tiden. Portrycket stiger som synes kraftigt vid katoden och sjunker vid anoden, medan portrycket mitt mellan anod- och katodrad förblivit opåverkat.

Effect of electro-osmosis on pore pressure measured in field 1 (1 in. electrodes) as function of time. A heavy increase in pore pressure is observed at the cathode and a heavy decrease at the anode, whereas the pore pressure half-way between the anode and cathode rows is not affected.

$$\frac{1}{R_{\text{tot } 1-3}} = \frac{10^3}{\rho} \left(\frac{1}{0,316} + \frac{1}{0,304} + \frac{1}{0,294} \right)$$

d v s

$$R_{\text{tot } 1-3} = 0,1015 \rho \cdot 10^{-3} \Omega$$

Med $U = 8,5 \text{ V}$ (7-10 V) och $I = 85 \text{ V}$, fås alltså
 $\rho = 990 \text{ } \Omega\text{cm}$ (810-1160 Ωcm)

Bilden av anodförbrukningen, FIG 23, tyder emellertid på att man i detta fall inte kan försumma jordresistansen. Då den verkliga jordresistansen inte kan beräknas exakt, får vi här nöja oss med en grov approximation. Som en andra ansats antas därför att den totala jordresistansen R_j mellan varje anod- och katodrad utgörs av den ohmska resistansen i en 5 m lång, 10 m hög och 2 m bred jordvolym, d v s

$$R_j = \frac{200\rho}{1000 \cdot 500} = 0,400 \rho \cdot 10^{-3} \Omega$$

Kopplingsdiagrammet med hänsynstagande till både jordresistans och övergångsresistans vid elektroderna får då det i FIG 21 givna utseendet. Man får av detta för ett fält totala motståndet

$$R_{\text{tot}} = \frac{(2R_a + R_j)(R_a + R_j)}{2(3R_a + 2R_j)} + \frac{R_k}{2} \quad (8)$$

där

$$\begin{aligned} R_a &= \text{totala övergångsresistansen för en anodrad} \\ &= 0,352 \rho \cdot 10^{-3} \Omega \text{ för fält 1} \\ &= 0,340 \rho \cdot 10^{-3} \Omega \text{ för fält 2} \\ &= 0,329 \rho \cdot 10^{-3} \Omega \text{ för fält 3} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} R_k &= \text{totala övergångsmotståndet för en katodrad} \\ &= 0,397 \rho \cdot 10^{-3} \Omega \text{ för fält 1} \\ &= 0,383 \rho \cdot 10^{-3} \Omega \text{ för fält 2} \\ &= 0,368 \rho \cdot 10^{-3} \Omega \text{ för fält 3} \end{aligned}$$

Insättes värdena på R_a , R_k och R_j erhålles för fält 1 $R_{\text{tot}} = 0,423 \rho \cdot 10^{-3} \Omega$, för fält 2 $R_{\text{tot}} = 0,410 \rho \cdot 10^{-3} \Omega$ och för fält 3 $R_{\text{tot}} = 0,400 \rho \cdot 10^{-3} \Omega$.

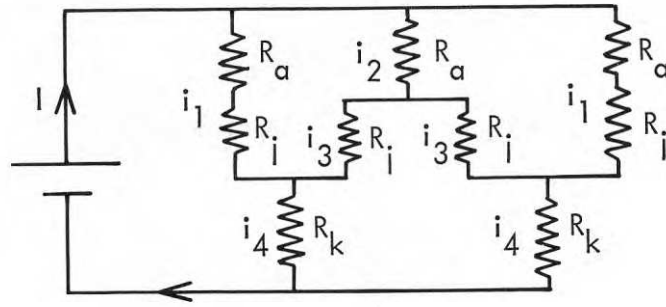


FIG. 21. Kopplingsschema vid körning av ett enstaka försöksfält
 R_a = övergångsresistans i en anodrad, R_j = jordresistans, R_k = övergångsresistans i en katodrad, I = total strömstyrka i hela fältet, i_1 = total strömstyrka i en yttre anodrad och i_2 = total strömstyrka i den mellersta anodraden.

Circuit diagram where voltage was applied to only one field at a time. R_a = anode-row to soil resistance, R_j = soil resistance, R_k = cathode-row to soil resistance, I = total input of current, i_1 = total current in outer anode row, i_2 = total current in central anode-row.

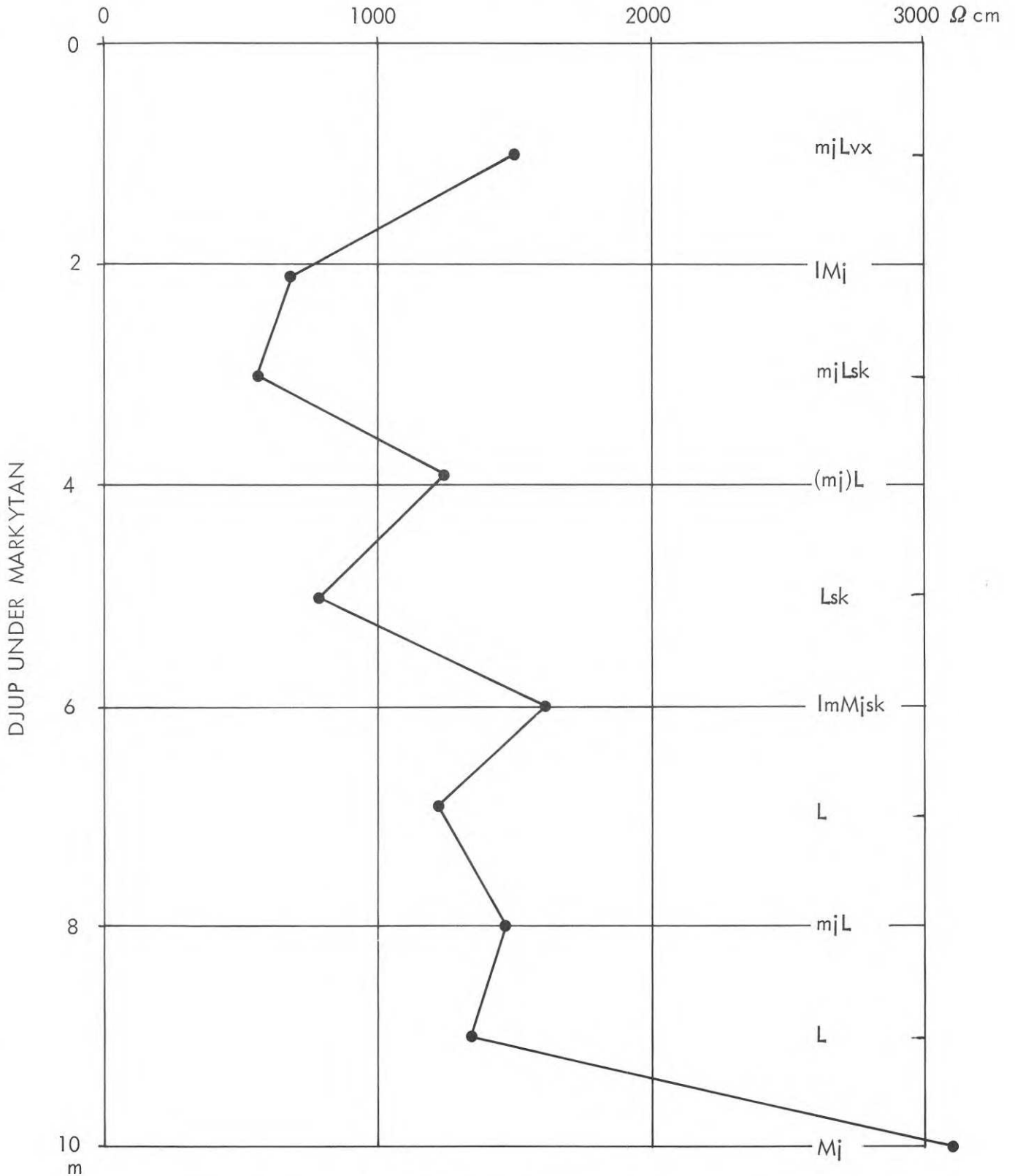
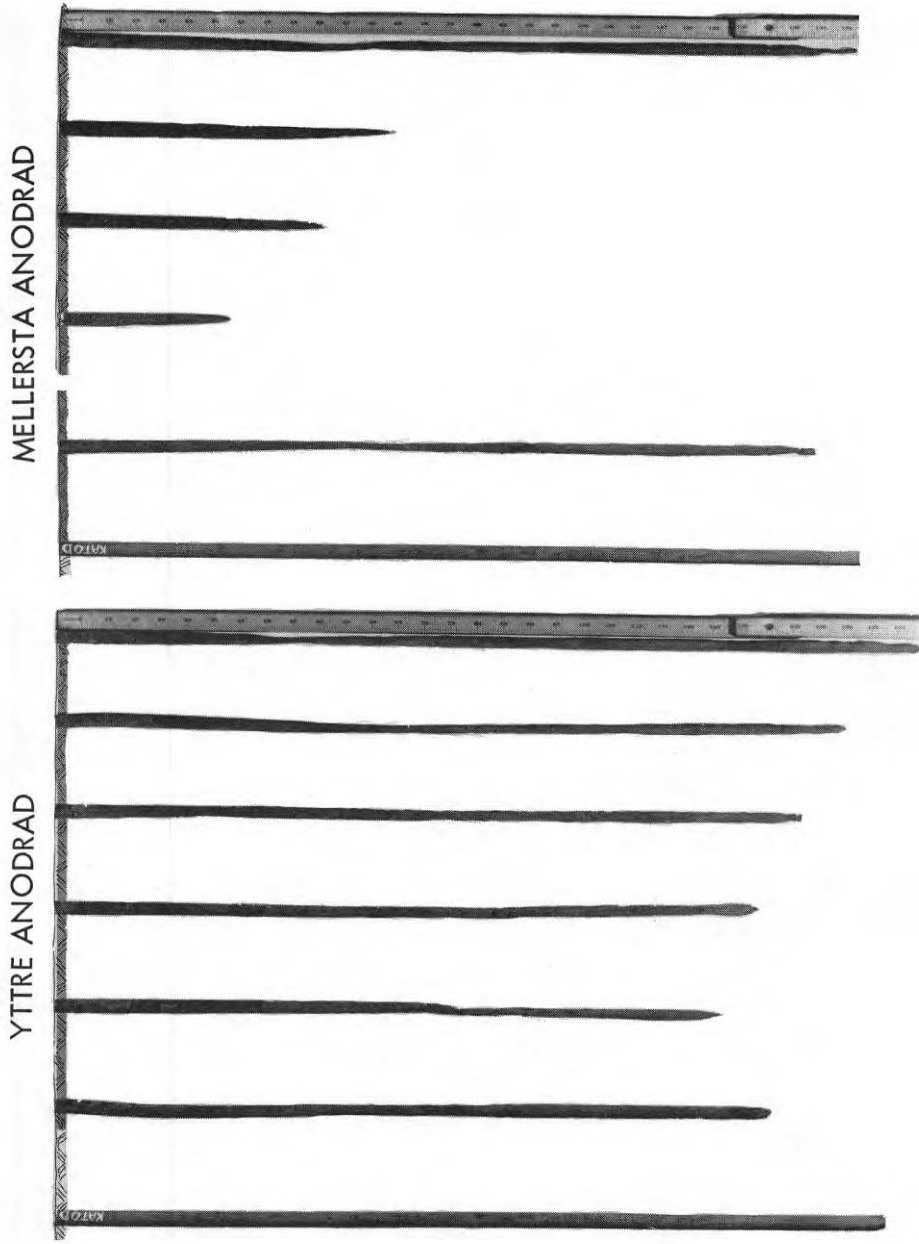


FIG. 22. Resistiviteten i jord ρ hos jordprover tagna ca 60 m nordväst om försöksfältet. Bestämningen utförd enligt van der Pauws metod.

Soil resistivity ρ of samples taken about 60 m NW of test field. ρ measured according to van der Pauw's method.



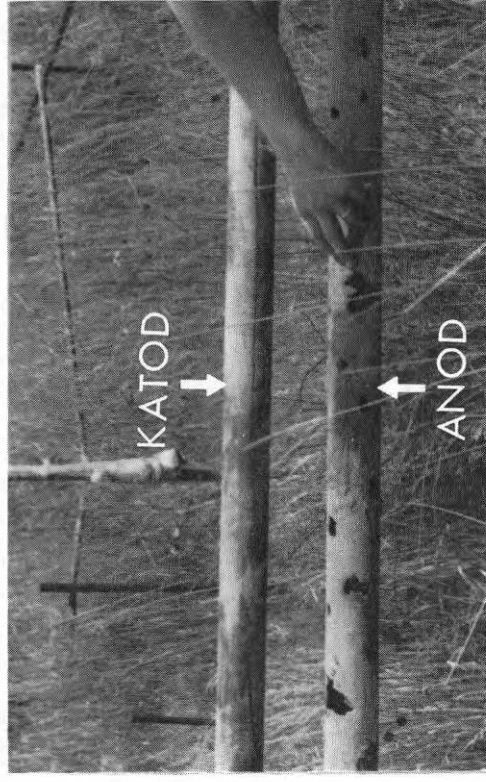
a

FIG. 23a. Anoderna i mellersta raden och ytterraden i fält 1 fotograferade efter uppdragning. En central anod i mellersta raden saknas på bilden. Fotot ger en viss (om ock osäker) bild på strömfördelningen mellan anoderna. Anoderna har vid uppdragningen slitits av strax under markytan.

Anodes in central and outer rows photographed after being pulled out of soil. One anode in central row missing. The figure gives a rough picture of current distribution between anodes. When pulled out of soil the anodes were torn off just under the ground surface.



b



c

b) Detaljbild av anod i fält 2 efter uppdragning
c) Anod och katod i fält 3 efter uppdragning

b) Anode in field 2 after end of electro-osmosis
c) Anode and cathode in field 3 after end of electro-osmosis.

Vid parallellkoppling av fälten ger dessa värden den totala resistansen

$$R_{\text{tot } 1-3} = 0,137\rho \cdot 10^{-3} \Omega$$

alltså 35 % högre värde än om jordresistansen försummas.

Med $U = 8,5 \text{ V}$ (7-10 V) och $I = 85 \text{ A}$ fås alltså

$$\rho = 730 \Omega \text{ cm} \text{ (600-860 } \Omega \text{cm)}$$

Efter inkoppling av enbart fält 1 krävdes en elektrisk spänning av 22-34 V, i medeltal ca 27 V, för att upprätthålla strömstyrkan 85 A, om man bortser från tiden efter ca 180 dygn, när resistansen i systemet successivt tilltar, sannolikt till följd av anodförbrukningen. Man får av detta med första ansatsen ($R_{\text{tot}} = 0,316\rho \cdot 10^{-3} \Omega$)

$$\rho = 1000 \Omega \text{cm} \text{ (820-1270 } \Omega \text{cm)}$$

och med andra ansatsen ($R_{\text{tot}} = 0,423\rho \cdot 10^{-3} \Omega$)

$$\rho = 750 \Omega \text{cm} \text{ (610-950 } \Omega \text{cm)}$$

För fält 2 fås på motsvarande sätt

$$\rho = 850 \Omega \text{cm} \text{ (675-1140 } \Omega \text{cm)} \text{ enligt ansats 1}$$

$$\rho = 630 \Omega \text{cm} \text{ (500- 850 } \Omega \text{cm)} \text{ enligt ansats 2}$$

För fält 3 fås

$$\rho = 900 \Omega \text{cm} \text{ (720-1320 } \Omega \text{cm)} \text{ enligt ansats 1}$$

$$\rho = 670 \Omega \text{cm} \text{ (530- 975 } \Omega \text{cm)} \text{ enligt ansats 2}$$

De sålunda beräknade värdena på ρ är förhållandevis låga, jämfört med de i laboratoriet bestämda värdena, FIG 22. Då laboratorieundersökningen utförts på en lerprofil, upptagen ca 60 m nordväst om försöksfälten, kan emellertid avvikelser betraktas som normal spridning.

Med det i FIG 21 givna kopplingsschemat erhålls

$$i_1 = \frac{2R_a + R_j}{2(3R_a + 2R_j)} \cdot I$$

$$i_2 = \frac{R_a + R_j}{3R_a + 2R_j} \cdot I$$

Den maximala strömstyrkan i anoderna kan av detta uppskattas variera mellan ca 0,08 I för de två centralt belägna anoderna och 0,05 I för ytteranoderna i mittraden samt mellan 0,06 I för de två centralt belägna anoderna och 0,04 I för de två yttersta anoderna i ytterraderna. Fördelningen av strömstyrkan mellan de centralt belägna anoderna och ytteranoderna i varje anodrad är givetvis inte matematiskt korrekt, men en exakt beräkning av fördelningen är mödosam och approximationen är från praktisk synpunkt godtagbar.

Under tidperioden då alla tre fält var inkopplade parallellt, sammanlagt 122 dygn, var medelströmstyrkan i fält 1 ca 26,8 A. Detta ger för var och en av de två centralt belägna anoderna förbrukningen 0,29 · 0,08 · 26,8 · 122 · 86400 mg eller 6,55 kg. Efter inkoppling av enbart fält 1 var strömstyrkan i medeltal 81,5 A under en sammanlagd tidperiod av 80 dygn. Anodförbrukningen för samma anoder ökar alltså med ytterligare 13,1 kg. Totalt skulle därmed de två mellersta anoderna i den centrala anodraden ha förlorat ca 19,7 kg av sin vikt. Antas anodernas verk samma längd vara 10 m skulle alltså i fält 1 anodförbrukningen, räknat på ursprungsvikten, variera mellan ca 51 % och 32 % för den centralt belägna anodraden samt mellan 38 % och 25 % för de yttre anodraderna, där de högre värdena avser de två mellersta och de lägre värdena de två yttersta anoderna i respektive anodrad. Motsvarande siffror för fält 2 har beräknats till ca 52 % och 33 % för

den centralt belägna anodraden samt 39 % och 26 % för de yttre anodraderna och för fält 3 till 28 % och 18 % för den centralt belägna anodraden samt 21 % och 14 % för de yttre anodraderna.

För att kontrollera anodförbrukningen drogs flera anoder upp efter försökets avslutning. Även katoder drogs upp för inspektion. På grund av den uttorkning av leran som inträffat intill anoderna hade dessa "växt fast" och gick av strax under markytan i fält 1 och 2 vid uppdragningen, i fält 3 på ca 4 m djup, i sådana snitt där strömkoncentrationen (och följaktligen även korrosionen) varit hög till följd av låg jordresistans, FIG 23 a-c. FIG 23 a antyder att den antagna strömfördelningen mellan anoderna i stort sett är riktig. Iakttagelsen att den totala resistansen i fält 1 ökar gradvis efter ca 180 dygns gång visar att övergångsresistansen mellan anoder och jord efter denna tid blir allt större, sannolikt genom att mantelytan hos anoderna genom korrosionen blivit alltför liten för att medge ett stationärt tillstånd.

Sättningar i leran

Jämför man de under avsnitt 3.4 erhållna värdena på volymminskningen i förhållande till förbrukad elmängd med de i laboratorium bestämda värdena på elektroosmotisk vattentransport minus gasutveckling finner man stora avvikelser - under försökets början då fälten var parallellkopplade praktiskt taget lika stora som i fallet Scania Vabis. Enligt FIG 15 finner man sålunda att man vid den strömtäthet som representerar 30 A/fält får en resulterande volymminskning av i medeltal ca $0,045 \text{ cm}^3/\text{C}$ i leran under 5 m djup mot de uppmätta värdena $0,007$ à $0,008 \text{ cm}^3/\text{C}$, medan man vid den strömtäthet som representerar ca 90 A/fält får ca $0,040 \text{ cm}^3/\text{C}$ mot de uppmätta värdena $0,014$ à $0,015 \text{ cm}^3/\text{C}$. Skillnaden är alltså avsevärt större vid den lägre strömtätheten, d v s under den tid då alla tre fält var inkopplade parallellt. Förklaringen till denna diskrepans synes i huvudsak ligga i att de genom elektroosmosen bildade porövertrycken vid katoderna och porundertrycken vid anoderna ger upphov till en hydraulisk vattentransport i riktning katod - anod, alltså motriktad den elektroosmotiska vatten-

transporten, ekv. (2). Tyvärr kan man i detta fall inte direkt kontrollera hur stora portrycksdifferenserna är i de olika fälten för det undre lerlager som här behandlats. De enda mätningar som gjorts gäller 5 m djup, d v s lerlagrets övre gränssyta, och några av mätningarna synes dessutom som nämnts inte heller vara tillförlitliga. De mest tillförlitliga mätningarna, vilka synes ha gjorts i fält 1, FIG 20, visar att portrycksdifferensen anod - katod är ca $4 \text{ à } 5 \text{ N/cm}^2$ när fälten var parallellkopplade, och ca $1,5 \text{ à } 2 \text{ N/cm}^2$ när enbart fält 1 var inkopplat (om man bortser från den första veckan efter omkopplingen). Antar man att dessa differenser är representativa för det betraktade lerlagret under 5 m djup och för samtliga fält samt att portrycket stiger rätlinjigt från anodrad till katodrad, erhåller man $\partial u/\partial x \approx 0,025 \text{ N/cm}^3$ när de tre fälten var parallellkopplade, och $\partial u/\partial x \approx 0,010 \text{ N/cm}^3$ när endast ett fält var inkopplat.

Permeabiliteten i vertikalled för det betraktade lerlagret kan ur de utförda ödometerförsöken beräknas till $1,5 \cdot 10^{-8}$ à $7,5 \cdot 10^{-8}$ cm/s, med ett medelvärde av ca $4 \cdot 10^{-8}$ cm/s. Permeabiliteten i horisontalled är sannolikt större och kan mycket väl ha ett värde av inemot 10^{-7} cm/s. Antar man försiktigtvis att permeabiliteten i detta fall är $k = 5 \cdot 10^{-8}$ cm/s, erhålls enligt ekv. (2) en hydraulisk strömningshastighet av

$$v_x \approx 13 \cdot 10^{-8} \text{ cm/s}$$

när fälten var parallellkopplade, och

$$v_x \approx 5 \cdot 10^{-8} \text{ cm/s}$$

när endast ett fält var inkopplat.

Med en antagen genomströmningsarea av 50 m^2 får man alltså för det betraktade lerlagret en hydraulisk vattentransport i riktning katod - anod av

$$q_w = 0,065 \text{ cm}^3/\text{s} = 5,6 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{dygn i förra fallet}$$

och

$$q_w = 0,025 \text{ cm}^3/\text{s} = 2,2 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{dygn i senare fallet,}$$

d v s totalt

$$Q_w \approx 0,6 \text{ m}^3 \text{ i förra fallet}$$

och

$$Q_w \approx 0,1 \text{ m}^3 \text{ för fält 1 i senare fallet (fram till dygn 160)}$$

$$0,2 \text{ m}^3 \text{ för fält 2 i senare fallet}$$

$$0,3 \text{ m}^3 \text{ för fält 3 i senare fallet}$$

Om den motriktade hydrauliska strömningen hade eliminerats genom att katoderna utformats som filterbrunnar från vilka pumpning utförts, skulle alltså den elektroosmotiska sättningen på 5 m djup ha ökat med ca 3,5 cm ($= 100 \cdot 0,6 / 19\sqrt{3}$) när fälten var parallellkopplade, och ca 0,5 cm, 1 cm och 1,5 cm för respektive fält 1 (fram till dygn 160), fält 2 och fält 3, sedan endast ett fält åt gången inkopplats. Adderas dessa värden till tidigare erhållna får man en volymminskning av 0,016 à 0,017 cm^3/C vid ca 30 A/fält och 0,015 à 0,017 cm^3/C vid ca 90 A/fält.

Man finner alltså att den elektroosmotiska vattentransporten minus gasutvecklingen har storleksordningen 0,016 cm^3/C , oberoende av insatt strömstyrka. Detta effektiva värde är emellertid endast ca 1/3 av det värde man kan förvänta sig av laboratorieförsöken.

Den gasutveckling som resulterat i svällning av leran ner till 5 m djup har diskuterats under avsnitt 3.4. Någon beräkning av svällningen med utgångspunkt från laboratorieförsöken låter sig inte göras, då den gasmängd som frigörs ur jorden genom sprickor e dyl är okänd.

Den genomförda analysen visar att man i de fall då gas bildas under elektroosmosbehandlingen inte kan nöja sig med att ange den elektroosmotiska permeabilitetskoefficienten k_e eller produkten $k_{e\rho}$ om man önskar beräkna sättningen. Hänsyn måste tas till den gasvolym som bildas och produkten $k_{e\rho}$ måste bytas ut mot elektroosmotisk vattentransport ($= k_{e\rho}$) minus gasutveckling per förbrukad elmängdsenhet.

Vattenhaltsminskning i leran

Den vattenhaltsminskning som erhållits i leran från 5 till 10 m djup motsvarar enligt tidigare genomförda beräkningar en kompression av 41 cm i fält 2 och 25 cm i fält 3. Dessa värden är emellertid som nämnts osäkra, vilket beror på jordens heterogena uppbyggnad och provtagningens ringa omfattning. Med tillägg för den kompression som enligt här nämnda utredning skulle ha inträffat om katoderna utformats som filterbrunnar vilka läns pumpats, skulle kompressionen varit 45 cm i fält 2 och 30 cm i fält 3.

Med den använda elmängden ca $0,8 \cdot 10^9$ C och en antagen avvattnad yta av $80 \text{ m}^2/\text{fält}$, erhålls härur $k_{e\rho} = 0,045 \text{ cm}^3/\text{C}$ för fält 2 och $0,030 \text{ cm}^3/\text{C}$ för fält 3, medan det på laboratoriet uppmätta medelvärdet från 5 till 10 m djup är $k_{e\rho} = 0,098 \text{ cm}^3/\text{C}$. Även med detta betraktelsesätt är alltså effekten av den elektroosmotiska behandlingen endast obetydligt mer än en tredjedel av vad man kan förvänta sig ur laboratorieförsöken.

3.9 Jämförelser med försöket i Skå-Edeby

En väsentlig skillnad föreligger mellan de just beskrivna försöken och försöket i Skå-Edeby därigenom att man i Skå-Edeby utformade katoden som en filterbrunn vilken under hela försöket läns pumpades. Det kan därför ha stort intresse att jämföra våra egna försöksresultat med dem som erhöles där. Jämförelsen försvåras tyvärr av att man i Skå-Edeby-fallet inte utförde några försök i elektroödometer, varför laboratorievärden på k_e och ρ saknas. Den kan därför endast ge en viss fingervisning, grundad på fältresultaten.

Kompression. Medan man i fallen Scania Vabis och Östra sjukhuset erhöles en sättning, motsvarande volymminskningen ca $0,005 \text{ cm}^3/\text{C}$ resp. $0,015 \text{ cm}^3/\text{C}$ fick man i Skå-Edeby värdet ca $0,03 \text{ cm}^3/\text{C}$, oberoende av det antal anoder som omgav centralkatoden. Kompressionen i Skå-Edeby stämde väl överens med vattenhaltsminskningen, varför någon väsentlig gasutveckling knappast är trolig.

Skjvåhållfasthet. I Skå-Edeby kunde någon hållfasthetsminskning intill katoden inte observeras till följd av elektroosmosbehandlingen. Hållfasthetstillväxten blev följaktligen mera jämnt fördelad och genomsnittligt högre; 50 % genomsnittlig förhöjning efter en förbrukad elmängd av $0,42 \cdot 10^9$ C (eller en förbrukad energi av 9,67 MWh).

Upphettning av elektroderna. Ehuru upphettningen av elektroderna tidigare inte berörts kan det vara intressant att notera skillnaden mellan resultaten i Skå-Edeby och Scania Vabis.

Enligt mätningarna i Skå-Edeby erhöll man sålunda vid anoderna en temperatur av ca $+18^{\circ}\text{C}$, jämfört med marktemperaturen $+6^{\circ}\text{C}$, och vid katoden en temperatur av ca $+80^{\circ}\text{C}$. Katodupphettningen var alltså här avsevärt högre än anodupphettningen. Jämförs detta med resultatet från Scania Vabis, FIG 24, finner man ett motsatt förhållande, nämligen att värmeutvecklingen blivit avsevärt större vid anoderna än vid katoderna, så stor t o m att snön på marken smält långt utanför. I det förra fallet var strömstyrkan i katoden ca 6 gånger högre än i anoderna, medan i senare fallet strömstyrkan var ca 50 % högre i anoderna än i katoderna. Resultatet, vilket i princip är en följd av Joules lag, visar att elektrodupphettningen kan bli avsevärd och ge upphov till termiska strömningar i porvattnet som eventuellt inte kan försummas. Anodupphettningen ökar dessutom allteftersom anoderna förbrukas och kan som nämnts leda till uttorkning av jorden närmast intill så att övergångsresistansen R_a blir mycket stor.

Kommentar. Att effekten av elektroosmosbehandlingen i Skå-Edeby blev bättre än vid Scania Vabis och Östra sjukhuset beror sannolikt, även om man inte direkt kan bevisa det, på pumpningen vid katoden. Fortsatta studier av elektroosmos bör därför främst omfatta jämförelser mellan intilliggande fält, där man i ena fallet utformar katoderna som filterbrunnar vilka läns pumpas, och i andra

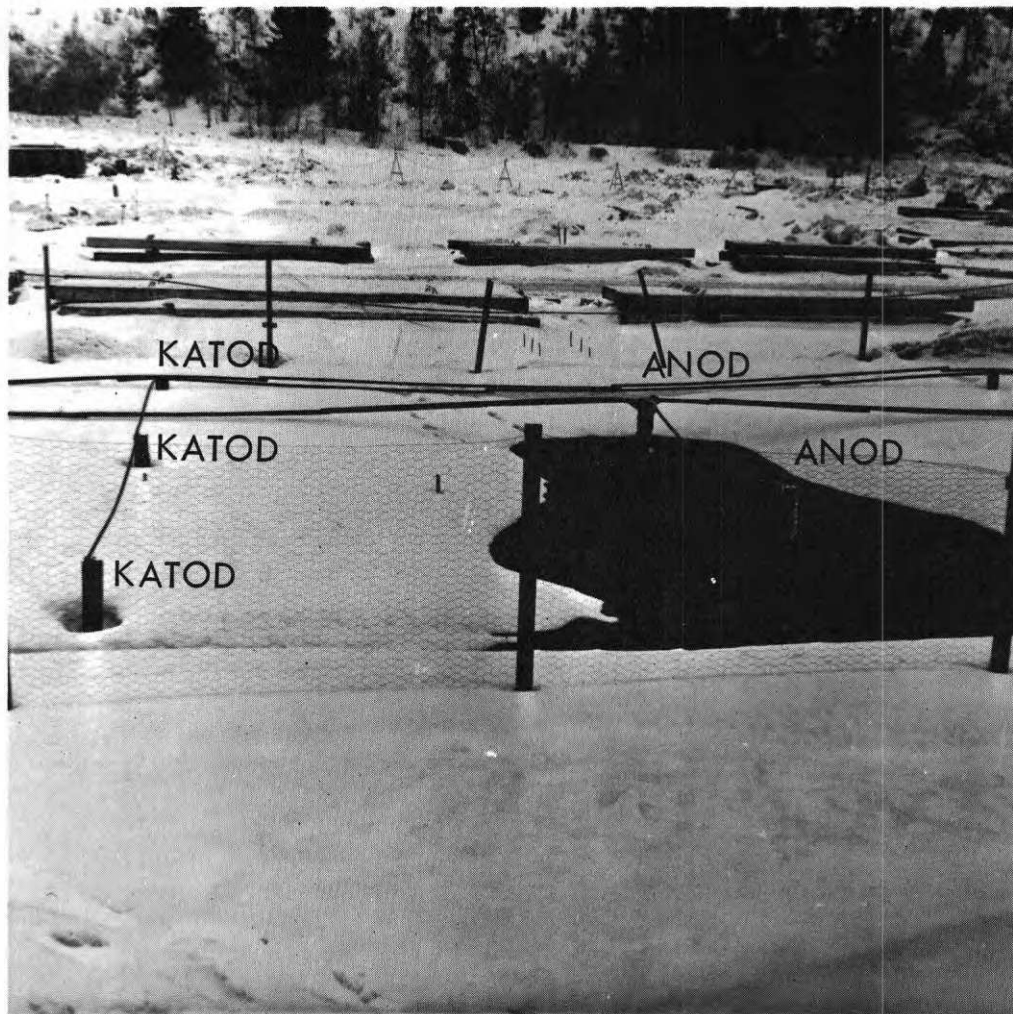


FIG. 24. En rad katoder (t.v. på bilden) och anoder (t.h.) under pågående elektroosmos på Scania Vabis, Södertälje, fotograferade under vintern 1965-66. Man ser att de genom elströmmen starkt uppvärmda anoderna och jordmassorna därintill smält snön på en yta av ca 20 m² närmast omkring anodraden.

Cathode row (to the left) and anode row (to the right) during electro-osmosis treatment at Scania Vabis, Södertälje. Photograph taken during the winter 1965-66. The current has heated the anodes to such an extent that the snow has melted on an area covering about 20 m² around the anode row.

fallet använder likadana katoder och anoder. Först då kan pumpningens betydelse klarläggas.

Resultaten från Skå-Edeby antyder att antalet anoder per katod eller anodplaceringen saknar betydelse för storleken av den transporterade vattenmängden per förbrukad elmängd.

De genomförda undersökningarna visar att det är praktiskt möjligt att dimensionera en elektroosmosanläggning med utgångspunkt från resistiviteten i jord bestämd på laboratorieprover, så att noggrannheten i relationen mellan önskad strömstyrka och erforderlig spänning blir tillfredsställande.

Den för en viss kompression eller avvattning erforderliga elmängden har befunnits vara avsevärt större än den med ledning av laboratorieförsök uppskattade, ca 3 gånger större vid Östra sjukhuset i Göteborg och ca 4 gånger större vid Scania Vabis i Södertälje. För bestämning av kompressionen genom elektroosmos är det nödvändigt att ta hänsyn till en eventuell gasutveckling. Denna har visat sig dominera över vattentransporten i de fall där leran innehåller snäckskal, och man har därför i sådana fall erhållit en resulterande svällning. I några fall har gasbildning nästan helt förhindrat vattentransport ($k_e \rightarrow 0$).

Skjuvhållfastheten hos leran har genomgående ökat intill anoderna, medan däremot en minskning i regel inträffat intill katoderna när dessa inte utformats som filterbrunnar vilka läns pumpats.

Sensitiviteten hos leran har genomgående ökat intill katoderna. Förkonsolideringstrycket i leran torde ha ökat intill anoderna, medan dess påverkan i övrigt synes mera oklar. Sannolikt blir effekten betydligt gynnsammare om katoderna utformas som filterbrunnar vilka läns pumpas.

Spänningsfallet närmast elektroderna har vid Östra sjukhuset i Göteborg varierat under elektroosmosbehandlingen och en klar tendens till ökning (ökande övergångsresistans) vid anoderna har endast erhållits för fält 1 med 1"-elektroder. Denna tendens har emellertid motverkats av successivt minskande spänningsfall vid katoderna, och en elektroosmotisk effektivitetsminskning (uttryckt som kompression per förbrukad elmängd eller energimängd)

har som tidigare påpekats inte inträffat förrän efter ca 160 dygn (ca 35 dygn efter inkoppling av endast fält 1) när anoderna sannolikt i stor utsträckning förbrukats.

Elektroosmosbehandlingen har följts av en relativt stor portrycksminskning vid anoderna och portrycksökning vid katoderna. Den därigenom förorsakade hydrauliska strömningen från katod mot anod kan, åtminstone vid låg strömstyrka, inte försummas vid sidan av den elektroosmotiska strömningen.

LITTERATUR

- BJERRUM, L, MOUM, J & EIDE, O, 1967, Application of elektro-osmosis to a foundation problem in Norwegian quick clay. *Géotechnique* 17:214-235.
- CASAGRANDE, L, 1947, The application of electro-osmosis to practical problems in foundations and earthworks (Dep. Scient. Ind. Res., Build. Res.) Techn. Paper No 30.
- EVANS, H E & LEWIS, R W, 1965, A theoretical treatment of the electro-osmotic consolidation of soils. *Civ. Engng Publ. Review*, p. 1495-1498.
- FREDÉN, S, 1962, Avvattning av leran med elektroosmos (Statens Väg-institut) Specialrapport 19. Stencil. Stockholm.
- KUPFMÜLLER, K, 1959, Einführung in die theoretische Elektrotechnik. 6:e uppl. p. 43. Springer, Berlin.
- MOUM, J, 1967, Elektroosmose, virkning og anvendelse innen geoteknikken (Norsk Geoteknisk Forening) NGF-Fordedraget 1967. Stencil. Oslo.
- van der PAUW, S, 1958, A method of measuring specific resistivity and Hall effect of discs of arbitrary shape. *Philip Res. Rep.* 13.
- SCHAAD, W, 1958, Praktische Anwendung des Electro-Osmose in Gebiete des Grundbaues. *Bautechnik* 35:6 och 11:210-216, p. 420-429.

R19: 1970

Denna rapport avser anslag nr C 439 från Statens råd för byggnadsforskning till Institutionen för geoteknik med grundläggning, CTH

**Distribution: Svensk Byggtjänst, Box 1403, 111 84 Stockholm
Abonnemangsgrupp: k (konstruktion)**

Pris: 15 kronor