



Det här verket har digitaliserats vid Göteborgs universitetsbibliotek och är fritt att använda. Alla tryckta texter är OCR-tolkade till maskinläsbar text. Det betyder att du kan söka och kopiera texten från dokumentet. Vissa äldre dokument med dåligt tryck kan vara svåra att OCR-tolka korrekt vilket medför att den OCR-tolkade texten kan innehålla fel och därför bör man visuellt jämföra med verkets bilder för att avgöra vad som är riktigt.

This work has been digitized at Gothenburg University Library and is free to use. All printed texts have been OCR-processed and converted to machine readable text. This means that you can search and copy text from the document. Some early printed books are hard to OCR-process correctly and the text may contain errors, so one should always visually compare it with the images to determine what is correct.



Rapport

R45:1975

Konsolidering av lera med elektroosmos

Rolf Larsson



Byggforskningen

SER

Konsolidering av lera med elektroosmos

En laboratoriestudie

Rolf Larsson

Föreliggande undersökning syftar till att klarlägga vilka faktorer som påverkar möjligheten till konsolidering av lera med elektroosmos. Konsolidering av lera med elektroosmos har använts praktiskt med positiva resultat men använda beräkningsmetoder för konsolideringsförloppet har visat sig otillfredsställande och många oväntade effekter har erhållits. I rapporten analyseras en mängd elektroosmosförsök. Resultaten av analyserna kan användas för bestämning av konsolideringsförlopp och slutsättning. Det redogörs också för de förändringar i leras geotekniska egenskaper som kan uppstå på grund av elektroosmos och hur dessa förändringar kan motverkas.

Stabilisering av slänter och schakter i finkorniga jordarter med hjälp av elektroosmos har sedan länge med framgång tillämpats i utlandet. Metoden utvecklades i huvudsak av Leo Casagrande (1953) 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. Metoden har nyligen tillämpats i mycket stor skala och med gott resultat vid schaktningsarbetena för tunnelbanan i Mexico City.

Försök att konsolidera lera med elektroosmos har utförts med varierande resultat. Det hittills mest framgångsrika utfördes av bl.a. Bjerrum (1968) i Ås i Norge. I Sverige gjordes fältförsök i mindre skala med elektroosmotisk avvattnings av lera som ett led i utredningen om en blivande storflygplats 1957–58 i Skå Edeby (Fredén, 1962). Bortsett härifrån har elektroosmos inte använts i Sverige, vare sig försöksmässigt eller praktiskt förrän vintern 1965–66. Då utfördes grundläggningsarbetena för chassiverkstaden för Scania-Vabis i kv. Bilbyggaren i Södertälje (Hansbo, 1970). Slutligen gjordes åren 1966–67 försök med elektroosmos i samband med utbyggnaden av Östra sjukhuset i Göteborg (Hansbo, 1970). I samtliga här redovisade fall har metoden att beräkna konsolideringsförloppet efter de formler för elek-

troosmotisk vattentransport som är baserade på fri vattengenomströmning givit otillfredsställande resultat.

Ovannämnda praktiska konsolideringsförsök har givit positiva resultat men samtidigt medfört många oväntade effekter. Det har visat sig att de geotekniska egenskaperna efter elektroosmos hos lera intill anoderna i vissa fall kraftigt skiljer sig från motsvarande egenskaper intill katoderna. Någon närmare förklaring till dessa avvikelser har inte givits.

De egna experimentella laboratorieundersökningarna har i korthet syftat till att belysa följande frågor.

- Vilka egenskaper hos lera påverkar möjligheten till elektroosmotisk avvattnings?
- Hur bestäms förkonsolideringsförloppet?
- Vilka yttre faktorer, såsom elektrodavstånd, överlagringsstryck och fri grundvattenyta, påverkar konsolideringsförloppet?
- Vilka förändringar i leras egenskaper uppstår?
- Hur kan eventuella negativa förändringar motverkas?
- Vilka undersökningar utöver vanlig laborierutin behöver utföras för att lämpligheten av elektroosmos skall kunna bedömas?

Försökens utförande

Undersökningen har utförts i laboratorium. Ett modellfält har byggts där effekten av elektroosmotisk konsolidering av lera under olika randvillkor har kunnat studeras. Försöken har varit renodlade så tillvida att inga främmande joner har tillsatts leran. Vidare har apparaturen bestått av material som på intet sätt påverkat leran. Lerans geotekniska egenskaper före och efter elektroosmos har noga undersökts. Sammanlagt har sju modellförsök utförts. Samtidigt har försök utförts i en elektroodometer under varierande betingelser för att utvärdera vilka parametrar som bestämmer konsolideringsförloppet. Åttio sådana försök har utförts.

Undersökta leror

Försöken har utförts på laboratorietillverkade prover. Lermaterialet utgörs

Bygghorsningen Sammanfattningar

R45:1975

Nyckelord:

elektroosmos, lera, konsolidering, laboratoriestudie

Rapport R45:1975 hänför sig till forskningsanslag 730516-8 från Statens råd för byggnadsforskning till institutionen för geoteknik med grundläggning, Chalmers tekniska högskola, Göteborg.

UDK 624.131.4:553.61

624.138.5

SfB A (19)

ISBN 91-540-2470-6

Sammanfattning av:

Larsson, R. 1975, Konsolidering av lera med elektroosmos. (Statens råd för byggnadsforskning) Stockholm. Rapport R45:1975, 115 s., ill. 22 kr + moms.

Rapporten är skriven på svenska med svensk och engelsk sammanfattning.

Distribution:

Svensk Byggtjänst
Box 1403, 111 84 Stockholm
Telefon 08-24 28 60

Grupp: Konstruktion

dels av marin lera från 4 m djup vid Hjalmar Brantingsplatsen i Göteborg. dels av varvig glaciärrer från Värnamo. Den marina leran har en lerhalt av 70 % och en organisk halt av 0,5–1 % (viktprocent av jordens torra massa). Lermneralet utgörs i huvudsak av illit. Glaciärreran har en lerhalt av 37 %. Lermneralet bedöms vara illit och karbonat. Leran har blandats med vatten med varierande salthalt till en vattenkvot av ungefär dubbla flytgränsen och därefter konsoliderats för ett vertikalt tryck av 30 kPa.

Jordresistivitet

En av de faktorer som påverkar leras lämplighet för elektroosmos är resistiviteten, ρ . Undersökningar av vilka egenskaper hos lera som påverkar resistiviteten visar att resistiviteten i lera i huvudsak beror på salthalten i porvattnet och på porvolymen.

Elektroosmotisk permeabilitetskoefficient

En annan faktor som bestämmer leras lämplighet för elektroosmos är den elektroosmotiska permeabilitetskoefficienten k_e . Undersökningar av Gray och Mitchell (1967) visar, att k_e för aktiv lera med hög jonbyteskapacitet är en funktion endast av vattenkvoten. Till denna kategori hör illit. Även för inaktiv lera med låg jonbyteskapacitet är k_e en funktion av vattenkvoten, men k_e minskar i detta fall också med ökande salthalt. Till denna kategori hör kaolin. Silt är inaktivt. En jämförelse mellan Gray & Mitchells värden och de som uppmätts i Skandinavien på såväl naturliga som laboratietillverkade leror visar mycket god överensstämmelse.

Ekvivalent konsolideringstryck

Lerorna har konsoliderats elektroosmotiskt i en elektroödometer. Omfattande försöksserier med olika förkonsolideringstryck och strömstyrkor har visat att också vid konsolidering gäller jämviktslaget för balanserad hydraulisk gradient:

$$k_e \frac{\Delta U}{\Delta x} = \frac{k}{g\rho_w} \frac{\Delta u}{\Delta x}$$

vilket gör att skillnaden i porvattenstryck mellan anod och katod (Δu) vid konsolideringens slut är

$$\Delta u = \frac{k_e g \rho_w}{k} \Delta U$$

Om portrycket antas variera rätlinjigt

mellan anod och katod följer att medel-effektivtrycksökningen $\Delta \sigma'_v$ i fält kan tecknas

$$\Delta \sigma'_v = \frac{1}{2} \frac{k_e g \rho_w}{k} \Delta u_k$$

där
 Δu_k = porvattenstrycksökning vid katod, kPa
 k_e = elektroosmotisk permeabilitetskoefficient, m²/sV,
 U = spänningsfall i leran mellan anod och katod, V
 x = avstånd mellan anod och katod
 k = hydraulisk permeabilitetskoefficient, m/s
 g = jordaccelerationen, m/s² (N/kg)
 ρ_w = vattnets densitet, t/m³
 Δu = skillnad i porvattenstryck mellan anod och katod, kPa

Konsolideringsförloppet

Både de tidigare nämnda fältförsöken och de nu utförda laboratorieundersökningarna visar att man vid en konstant strömstyrka till en början får en konstant sättningshastighet (avvattningshastighet). Laboratieförsöken visar att sättningshastigheten förblir konstant tills ca 60 % av slutsättningen nås. Därefter avtar hastigheten snabbt. För att undersöka inverkan av olika faktorer på sättningshastigheten har försök med varierande överlagringstryck, förkonsolideringstryck och strömstyrkor utförts. Totalt omfattar försöksserien 80 försök i elektroödometer och 7 i modellefält varav ett med varierande strömstyrka.

För sättningshastigheten \dot{s}_v i konsolideringsförloppet begynnelsestadium i ett fält med parallella elektrodrader kan enligt försöken följande empiriska samband uppställas

$$\frac{\rho B I^2}{L D} = \dot{s}_v B \left(\frac{2 B I}{k_e D} + L M c_e \right)$$

där
 ρ = resistivitet, Ω m
 B = avstånd mellan elektrodrader, m
 I = strömstyrka, A
 L = elektrodradens längd, m
 D = effektiva verkningsdjupet hos en elektrod, m
 \dot{s}_v = vertikal medelsättningshastighet, m/s
 k_e = elektroosmotisk permeabilitetskoefficient, m²/Vs
 M = sekantmodul för medeleffektivspänningsändringen från begynnelse till slutstadium, kPa

c_e = effektivitetskoefficient
 Effektivitetskoefficienten c_e har befunnits vara en funktion enbart av salthalten i porvattnet.

Förändringar i leras geotekniska egenskaper till följd av elektroosmos

I samtliga försök utom i ett där salthalten i porvattnet endast var 0,1 % har stora förändringar i konflytgräns och sensitivitet ägt rum. Konflytgränsen ökar vid anoden och minskar vid katoden.

Sensitiviteten minskar vid anoden och ökar vid katoden. I flera fall bildas kvicklera vid katoden. Erhållna förstärkningseffekter (ökning av skjuvhållfasthet och förkonsolideringstryck) är större vid anoden och mindre vid katoden än vad som kan förväntas på grund av vattenkvotminskningen.

De uppkomna förändringarna har en mycket stor likhet med dem som uppstår vid urlakning av en marin lera. En analys av porvattnet efter elektroosmos visar nämligen att salthalten ökat vid anoden och minskat vid katoden. (Dessutom tyder det utpressade porvattnets färg på att vattenlösliga humusämnen kan ha bildats vid katoden, vilket skulle kunna dispergera lersystemet till en kvicklera.) Ytterligare en förklaring till de låga förstärkningseffekterna vid katoden är att sättningarna där delvis utbildas genom påhängskraft från lera närmare anoden och att skjubbrott uppstår i leran intill katoden vid långt driven elektroosmos.

En mera likformig förstärkning av lera kan erhållas genom att vända strömriktningen några gånger under försöket. Emellertid kräver detta en längre tid eftersom en viss tid åtgår innan den elektroosmotiska gradienten har vänt och återuppbyggs. Undersökningar har också utförts för att utvärdera huruvida det uppstår elektrofores, ett fenomen innebärande att de minsta lerpartiklarna i samband med elektroosmos rör sig i riktning mot anoden. Dessa undersökningar har utförts genom slammingsanalyser och genom studier av leran i elektronmikroskop. Ingenting som tyder på elektrofores har emellertid framkommit vid dessa undersökningar.

Inverkan av snäckskal bör också observeras. Vid försöket med elektroosmos vid Östra sjukhuset i Göteborg befanns sålunda att den gasutveckling som uppstod i ett snäckskalager på 5–6 m djup var så stor att den försakade en hävning.

Electroosmotic consolidation of clay

A laboratory study

Rolf Larsson

The purpose of the investigation is to make clear what factors affect the possibilities for electroosmotic consolidation of clays. Electroosmotic consolidation of clay has been used in practice with success but the used methods to estimate the progress of consolidation have been unsatisfactory and many unexpected effects have been received. In this report a number of tests with electroosmosis are analyzed. The results of the analyses can be used to determine the consolidation process and the final settlement. In the report is also accounted for what changes in the geotechnical properties in clay can occur due to electroosmosis and how they can be avoided.

The stabilization of slopes and excavations in fine-grained soils by counteracting the hydraulic gradient with electroosmosis has been successfully used abroad for a long time. The method was principally developed by Leo Casagrande (1953), who also directed one of the best known and most successful practical applications in Scandinavia in connection with the excavation for the submarine harbour in Trondheim during World War II. The method has recently been applied on a very large scale and with good result during the excavations for the underground railway in Mexico City.

Attempts to stabilize and consolidate clay by electroosmosis have met with variable results. The most successful attempt so far was made in Aas in Norway (Bjerrum et al., 1968). In Sweden minor field experiments for electroosmotic consolidation of clay were carried out as part of the 1957–58 investigation for a new air port in Skå Edeby (Fredén, 1962). Apart from this, electroosmosis had probably not been used in Sweden, either for experiments or in practice, until the winter 1965–66. Then the foundation-works for the Scania-Vabis chassis-factory in Södertälje were constructed (Hansbo, 1970). In 1966–67 experiments with electroosmosis were made when the Östra sjukhus in Göteborg was extended (Hansbo, 1970). In all these cases the formulas for electroosmotic water transport which are based on free water flow have given unsatisfactory estimates of the progress of consolidation.

The practical attempts to consolidate clay mentioned above have given posi-

tive results but many unexpected effects have been received. It has been shown that in some cases the geotechnical properties of the clay after the electroosmosis differ considerably at the anode and the cathode. No thorough explanation of these variations has been given.

The main purpose of the laboratory experiments in this report has been to study the following questions:

- What properties of the clay can affect the possibilities for electroosmotic consolidation?
- How can the progress of consolidation be estimated?
- What external factors, such as electrode distance, overburden pressure and free groundwater level can affect the consolidation process?
- What changes in the clay properties can occur?
- How can possible negative changes be avoided?
- What tests apart from the routine laboratory tests have to be made in order to judge the suitability for electroosmosis?

Tests performed

The investigation has been carried out in a laboratory. A model field has been built where the effect of different external conditions on electroosmotic clay consolidation can be studied. The tests have been pure in that no foreign ions have been added to the clay and the apparatus has been made of materials which in no way affect the clay. The geotechnical properties of the clay before and after the electroosmosis have been thoroughly examined. Altogether seven model tests have been performed. Parallel with these model tests experiments have been carried out under various conditions in an electro-oedometer in order to find out what parameters influence the consolidation process. Eighty such experiments have been performed.

Tested clays

The tests have been made on laboratory prepared samples. The clay material is partly a marine clay taken from 4 meters' depth at Hjalmar Brantingsplatsen in Göteborg, partly a varved ice-river clay from Värnamo. The marine clay has a clay content of 70% and an organic matter of 0.5–1%. (Weight percentage of the soil's dry weight). The clay

Swedish Building Research Summaries

R45:1975

Key words:
electroosmosis, clay, consolidation, laboratory study

Report R45:1975 refers to research grant 730516-8 from the Swedish Council for Building Research to Chalmers University of Technology, Geotechnical Division, Göteborg.

UDC 624.131.4:553.61
624.138.5
SfB A (19)
ISBN 91-540-2470-6

Summary of:

Larsson, R. 1975. Konsolidering av lera med elektroosmos. Electroosmotic consolidation of clay. (Statens råd för byggnadsforskning) Stockholm. Report R45:1975. 115 p., ill. Kr. 22.

The report is in Swedish with Swedish and English summaries.

Distribution:

Svensk Byggtjänst
Box 1403, S-111 84 Stockholm
Sweden

mineral mainly consists of illite. The ice-river clay has a clay content of 37 %. The clay minerals are considered to be illite and carbonate. The clays have been mixed with water with varying salinity up to approximately twice the liquid limit and have thereafter been consolidated with a vertical pressure of 30 kPa.

The soil resistivity

One of the factors affecting a clay's suitability for electroosmosis is the resistivity, ρ . Investigations regarding the properties of a clay that affect the resistivity show that the resistivity of a clay mainly depends on the salinity of the porewater and the porosity.

The electroosmotic permeability coefficient

Another factor determining a clay's suitability for electroosmosis is the electroosmotic permeability coefficient k_e . Investigations by Gray & Mitchell (1967) show that for active clays with a high ion-exchange capacity k_e is a function of the water content only. Illite can be classed as an active clay mineral. Also for inactive clays with a low ion-exchange capacity k_e is a function of the water content but k_e decreases in this case with increasing salinity. Kaolin is such a clay. Silts are also inactive. A comparison between the values of k_e given by Gray & Mitchell and those measured in Scandinavia on both natural and laboratory prepared clays shows very close agreement.

The equivalent consolidation pressure

The clays have been electroosmotically consolidated in an electrooedometer. Comprehensive test series with different currents and preconsolidation pressures have shown that the formula for equilibrium at counteracted hydraulic gradients

$$k_e \frac{\Delta U}{\Delta x} = \frac{k}{g\rho_w} \frac{\Delta u}{\Delta x}$$

also applies for consolidation.

This makes the difference in the porewater pressure between the anode and the cathode (Δu) at the end of the consolidation

$$\Delta u = \frac{k_e g \rho_w}{k} \Delta U$$

If the pore pressure drop between the anode and the cathode is assumed to be linear the average increase of the effective vertical stress $\Delta \sigma'_v$ in the field can be written

$$\Delta \sigma'_v = \frac{1}{2} \frac{k_e g \rho_w}{k} \Delta U - \Delta u_k$$

where

- Δu_k = increase in the porewater pressure at the cathode, kPa
- Δ = distance between the anode and the cathode, m
- k_e = electroosmotic permeability coefficient, m^2/sV
- ΔU = voltage drop in the clay between the anode and the cathode, V
- Δx = distance between the anode and the cathode, m
- k = hydraulic permeability coefficient, m/s
- g = gravitational acceleration at the earth's surface, m/s^2 (N/kg)
- ρ_w = water density, t/m^3
- Δu = drop in porewater pressure between the anode and the cathode, kPa.

The consolidation process

Both the previously mentioned field tests and the laboratory tests now performed show that at a constant current a constant consolidation rate is obtained initially. The laboratory tests show that the rate remains constant until about 60 % of the final settlement is reached. Thereafter the rate decreases rapidly. In order to investigate the influence of different factors on the rate of settlement tests have been made with different overburden pressures, preconsolidation pressures, and currents. In all the test series comprises eighty tests in the electro-oedometer and seven in the model field. One of the model field tests was run with varying current.

These tests have given the empirical relation that the rate of settlement \dot{s}_v at the beginning of the consolidation process in a field with parallel rows of electrodes can be determined from

$$\frac{\rho B I^2}{L D} = \dot{s}_v B \left(\frac{2 B I}{k_v D} + L M c_e \right)$$

where

- ρ = soil resistivity, Ωm
- B = distance between the electrode rows, m
- I = current, A
- L = length of the electrode row, m
- D = effective depth of electrode action, m
- \dot{s}_v = vertical average rate of settlement, m/s
- k_e = electroosmotic permeability coefficient, m^2/Vs
- M = secant modulus for the average change in effective stress from the start until 100 % consolidation is reached, kPa
- c_e = coefficient of efficiency

The electroosmotic consolidation coefficient of efficiency c_e , has been

found to be a function of the porewater salinity.

Changes in the geotechnical properties of clay during electroosmosis

In all tests except one, where the salinity was as low as 0.1 %, great changes have taken place in the liquid limit and the sensitivity. The liquid limit increases at the anode and decreases at the cathode.

The sensitivity decreases at the anode and increases at the cathode. In many cases quick-clay is produced at the cathode. The strengthening effects (increase in shear strength and preconsolidation pressure) received are greater at the anode and smaller at the cathode than those expected due to the decrease in water content.

The changes which have occurred show a very close resemblance to those resulting from the leaching of a marine clay. An analysis of the porewater after the electroosmosis shows that the salinity has increased at the anode and decreased at the cathode. Furthermore, the colour of the expelled porewater indicates that water soluble organic substances, likely to disperse the clay system into a quick-clay, can have been produced at the cathode. Another explanation of the low strengthening effects at the cathode is that the settlements there are affected by supporting forces to clay closer to the anode, and that when the electroosmosis is continued for a long time shear failure occurs in the clay at the cathode.

A more homogenous strengthening of the clay can be achieved by changing the current direction a few times during the electroosmosis. However, these changes will make the electroosmosis take longer since a certain period of time is required before the electroosmotic gradient has reversed and has been rebuilt. Investigations have also been made in order to find out whether electrophoresis occurs, i.e. whether fine clay particles are moving towards the anode during electroosmosis. These investigations have been made by sedimentation analyses and by studies of the clay in an electron microscope. Nothing that indicates electrophoresis has emerged from these investigations.

The influence of shells should be observed. When experiments with electroosmosis were made at the Östra sjukhus in Göteborg it was found that the gas development occurring in a layer of shells at a depth of 5–6 m was so great that it caused the ground to heave (Hansbo, 1970).

Rapport R45:1975

KONSOLIDERING AV LERA MED ELEKTROSMOS;
En laboratoriestudie

Rolf Larsson

Denna rapport hänför sig till forskningsanslag 730516-8 från
Statens råd för byggnadsforskning till institutionen för
geoteknik med grundläggning, Chalmers tekniska högskola, Göteborg.

Statens råd för byggnadsforskning, Stockholm
ISBN 91-540-2470-6

Liber Tryck Stockholm 1975

I föreliggande rapport redogörs för ett laboratoriestudium av möjligheten att konsolidera lera genom elektroosmos. Undersökningen avser dels att studera vilka egenskaper hos leror som bestämmer om de kan konsolideras med elektroosmos, dels att studera hur lerans geotekniska egenskaper förändras genom elektroosmos samt att få fram nya och säkrare beräkningsmetoder.

Projektet har finansierats genom anslag från Statens råd för byggnadsforskning och har genomförts vid institutionen för geoteknik med grundläggning, Chalmers tekniska högskola under ledning av professor Sven Hansbo.

För osparad möda och all uppmuntran vill jag tacka alla mina kollegor vid institutionen. Ett speciellt tack riktas också till docent Rolf Söderblom, Statens geotekniska institut, Doctor Keith Tovey och Roger Turner, University of East Anglia, Norwich, England och till Doctor Ian Johnston, Monash University, Melbourne, Australien.

Göteborg i mars 1975

Rolf Larsson

INNEHÅLL

1	FÖRORD	
2	BETECKNINGAR OCH DEFINITIONER	5
3	INTRODUKTION	7
3.1	Allmänt	7
3.2	Undersökningens syfte och omfattning	8
4	LITTERATURSTUDIUM	10
4.1	Elektroosmos	10
4.2	Fri vattenströmning på grund av elektroosmos	12
4.3	Motverkan av hydraulisk gradient med elektroosmos	13
4.4	Jordresistivitet	13
4.5	Elektroosmotisk permeabilitetskoefficient	14
4.6	Elektroosmotisk konsolidering	15
4.7	Förändringar av leras egenskaper genom elektroosmos	17
4.8	Förändringar av leras egenskaper genom urlakning	19
4.9	Beräkning av övergångsresistans mellan elektroder och jord	21
4.10	Anodförbrukning	21
4.11	Strömbegränsning	21
5	MÄTNING AV ELEKTROOSMOTISKA PARAMETRAR. Apparatur och försöksmetoder	23
5.1	Jordresistivitetsmätning	23
5.2	Bestämning av elektroosmotisk permeabilitet	27
5.3	Elektroosmotisk konsolidering	31
5.4	Modellfält	33
5.5	Tillverkning av prover för modellfält	37
6	FÖRSÖKSMATERIALET	43
7	FÖRSÖK	46
7.1	Modellfält	46
7.2	Resultat av modellfältförsök	46
7.3	Försök i elektroödometer	76
7.4	Resultat av elektroödometerförsök	76
8	DISKUSSION AV FÖRSÖKSRESULTAT OCH SLUTSATSER	80
8.1	Jordresistivitet	80
8.2	Elektroosmotisk permeabilitetskoefficient	82
8.3	Konsolideringsförloppet	83
8.4	Ekvivalent konsolideringstryck	85
8.5	Inverkan av permeabla skikt	88
8.6	Sättningshastighet	89
8.7	Förändringar av leras geotekniska egenskaper	94
8.8	Allmänt om dimensionering	97
9	LITTERATUR	100
	BILAGOR	103

2 BETECKNINGAR OCH DEFINITIONER

Allmänt definieras använda beteckningar när de första gången uppträder i texten. För beteckningar som återkommer ett flertal gånger har nedanstående sammanställning gjorts:

A	area
B	avstånd mellan elektrodrader
c_v	konsolideringskoefficient
c_e	effektivitetskoefficient
D	djup
d	diameter
g	tyngdkraftens acceleration
h	höjd
I	strömstyrka
k	permeabilitetskoefficient
k_e	elektroosmotisk permeabilitetskoefficient
L	längd av elektrodrad
M	sektantmodul
m_v	kompressibilitet
n	porositet, antal
Q_e	elmängd
Q_w	vattenmängd
R	elektriskt ledningsmotstånd
S	elektroдавstånd i en rad
\dot{s}	sättningshastighet
T_v	tidsfaktor
t	tid
U	elektrisk potential
u	porvattentryck
v	hastighet
w	vattenkvot
w_F	konflytgräns ($\approx w_L =$ stötflytgräns)
w_P	plasticitetsgräns
x	avstånd
λ	konduktivitet
ρ	densitet resistivitet
ρ_s	kompaktdensitet
ρ_w	vättnets densitet
σ	totaltryck (totalspänning)

σ'	effektivtryck (effektivspänning)
σ'_c	förkonsolideringstryck
τ_{fu}	odränerad skjuvhållfasthet
τ_R	omrörd skjuvhållfasthet

3 INTRODUKTION

3.1 Allmänt

Det fysikaliska fenomenet elektroosmos upptäcktes i Moskva år 1809 av F. F. Reuss. Fenomenet innebär praktiskt att en likström i en vattenmättad lera medför en vattenströmning från anod till katod.

Rent praktiskt började elektroosmos användas inom grundläggnings-tekniken på 1930-talet, främst i Tyskland av Leo Casagrande. De flesta försök som gjordes gick ut på att sänka grundvattenytan vid schaktning och motverka den hydrauliska gradienten. I många fall visade sig elektroosmosen vara vida överlägsen andra metoder för porvattentryckssänkning i finkorniga jordar. Den har använts i stor skala i Norge vid schaktningen för ubåtshamnen i Trondheim, Casagrande (1953). Andra lyckade appliceringar i stor skala har rapporterats från Mexico, Sovjetunionen, Japan och Tyskland.

Försök har gjorts att driva in olika kemiska lösningar i lera med elektroosmos och på så vis erhålla en kemisk förstärkning. En annan användning har varit att försöka höja pålars mantelbärighet genom att först klä mantelytan med metall och sedan få till stånd ett jonbyte med leran genom elektroosmos. Resultaten från elektro-kemiska försök och jonbytesförsök är motsägelsefulla och osäkra.

Ett fall av stabilisering av en jorddamm har rapporterats från USA. Porvattentrycket i ett djupt lerlager steg under byggnadstiden till så höga värden att stabiliteten äventyrades. Porvattenöverttrycken togs bort genom elektroosmos, Fetzer (1967).

På senare tid har omfattande försök utförts i avsikt att underlätta påslagning med elektroosmos. Genom att göra pålen till katod fås en vattenanrikning runt pålen och nedträngningen underlättas. På motsvarande sätt kan leras vidhäftning mot spont reduceras och teoretiskt kan en ren spont dras upp ur leran.

Försök att konsolidera lera med elektroosmos har utförts med skiftande resultat.

Det första försöket i Sverige utfördes i samband med undersök-

ningar för en storflygplats i Skå-Edeby 1958, Fréden (1962). 1964 utfördes en elektroosmotisk avvattning av en kvicklera i Ås i Norge, Bjerrum *et al.*, (1968). Resultatet blev en stor framgång trots att inte beräkningarna stämde och att många oväntade förändringar i leran uppträdde. Åren 1965-67 utfördes två konsolideringsförsök i Sverige, Hansbo (1970). Detta första var i samband med grundläggning av chassiverkstaden för Scania Vabis i Södertälje. Ett maximalt 4 meter tjockt lerlager under en utlagd 6-7 m hög sand och grusfyllning skulle konsolideras. Det andra försöket utfördes som ett led i undersökningarna för det blivande Östra sjukhuset i Göteborg där ett ca 10 meter tjockt lerlager skulle konsolideras. I båda fallen visade sig avvattningseffekten av elektroosmos vara betydligt mindre än förväntat. Vid försöket vid Östra sjukhuset visade det sig också att det i ett snäckskalslager utvecklades så mycket gas vid den elektriska behandlingen att en hävning uppstod.

Förändringarna i lerans egenskaper av elektroosmos varierade och var inte enbart positiva. Sedan dess har inga försök att konsolidera lera med elektroosmos utförts i Sverige. Detta har främst berott på frånvaron av säkra beräkningsmetoder och osäkerheten om slutresultatet. Forskning inom området bedrivs för närvarande främst i USA.

3.2 Undersökningens syfte och omfattning

Syftet med undersökningen har varit att i laboratorium studera effekten av elektroosmos vid konsolidering av lera. Vid behandling av lera med elektroosmos uppstår ett flertal processer av fysikalisk och kemisk natur. Tyngdpunkten i denna undersökning har lagts på avvattningseffekten. En del av de övriga processerna beror dock på lerans inre sammansättning och egenskaper och kan inte negligeras. Ett studium av de processer som oundvikligen uppkommer vid elektroosmos har därför gjorts. I korthet har undersökningen syftat till att belysa följande frågor:

- Vilka egenskaper hos lera påverkar möjligheten till elektroosmotisk konsolidering?
- Hur bestäms konsolideringsförloppet?
- Vilka yttre faktorer såsom elektrodavstånd, överlagringstryck och fri grundvattenyta påverkar konsolideringsförloppet?
- Vilka förändringar i leras egenskaper uppstår?

- Hur kan eventuella negativa förändringar motverkas?
- Vilka undersökningar förutom den vanliga laboratorierutinen behöver utföras för att lämpligheten för elektroosmos skall kunna bedömas?

Undersökningen har utförts i laboratorium. Ett modellfält har byggts där effekten av elektroosmotisk konsolidering av lera vid olika randvillkor har kunnat studeras. Försöken har varit renodlade så tillvida att inga främmande joner har tillsatts och apparaturen har bestått av material som inte på något sätt påverkat lerorna. Lerornas geotekniska egenskaper före och efter elektroosmos har noga undersökts. Sammanlagt har sju modellförsök utförts.

Parallellt med dessa försök har försök utförts i en elektroödometer under varierande betingelser för att utröna vilka parametrar som bestämmer konsolideringsförloppet. Åttio sådana försök har utförts.

De i denna undersökning provade lerorna har varit laboratorietillverkade. Därigenom har jämförande försök på identiska leror kunnat göras.

I mån av tillgång på fullständiga materialdata har resultat från egna tidigare försök och andra forskares redovisade resultat medtagits.

Undersökningen har utförts under tiden november 1973 - mars 1975.

4 LITTERATURSTUDIUM

4.1 Elektroosmos

Gray & Mitchell (1967) har givit en ingående förklaring till fenomenet elektroosmos. När ett elektriskt fält appliceras till en elektrolyt vandrar de positiva jonerna till katoden och de negativa jonerna till anoden. En resulterande strömning i en riktning, elektroosmos, uppstår när den överförda rörelsemängden mellan vandrande joner av ett tecken och omgivande vattenmolekyler överstiger den från joner av motsatt tecken.

Ingen elektroosmos uppstår i en fri elektrolyt. I detta fall är koncentrationen av positiva och negativa joner lika. Alltså ger ett elektriskt fält lika och motsatt rörelsemängd till positiva och negativa joner. Den resulterande överförda rörelsemängden till vattenmolekylerna är därför noll. Bortsett från dissocierat vatten sker därför ingen vattentransport på grund av inverkan från de vandrande jonerna.

I leror och i andra jonbytare är situationen en helt annan. I dessa material är de positiva joner som erfordras för att balansera de fasta partiklarnas negativa ytladdningar i majoritet. Dessa överför därför en större rörelsemängd till vattnet än de negativa jonerna, vilket resulterar i en vattentransport i samma riktning som de positiva jonerna vandrar, dvs mot katoden. Vattentransportens hastighet beror på det applicerade elektriska fältet, strömningsmotståndet i jorden och den överförda rörelsemängden från jonerna till vattenmolekylerna.

Av fundamental betydelse för elektroosmos är därför fördelningen mellan positiva och negativa joner och vatten-jonfördelningen i jorden.

Proportionerna mellan positiva och negativa joner beror på lermineralets jonbyteskapacitet, salthalten i porvattnet och vattenkvoten. Det elektroosmotiska vattenflödet i en aktiv lera med hög jonbyteskapacitet och låg vattenkvot är relativt okänsligt för salthalten i porvattnet. I en inaktiv lera med låg jonbyteskapacitet avtar det elektroosmotiska vattenflödet hastigt med ökande salthalt.

Exempel på aktiva lermineral är illit och bentonit medan kaolinit är inaktivt. Silt är inaktivt.

Enligt Spiegler's friktionsmodell för elektroosmotiskt vattenflöde är den elektroosmotiska vattentransporten per laddningsenhet proportionell mot förhållandet mellan antalet vattenmolekyler och antalet positiva joner bundna av den fasta fasens ytladdning.

Vattentransporten per enhetsladdning blir alltså högst för inaktiva material med hög vattenkvot.

Den kombinerade effekterna av aktivitet, vattenkvot och salthalt visas schematiskt i FIG. 1.

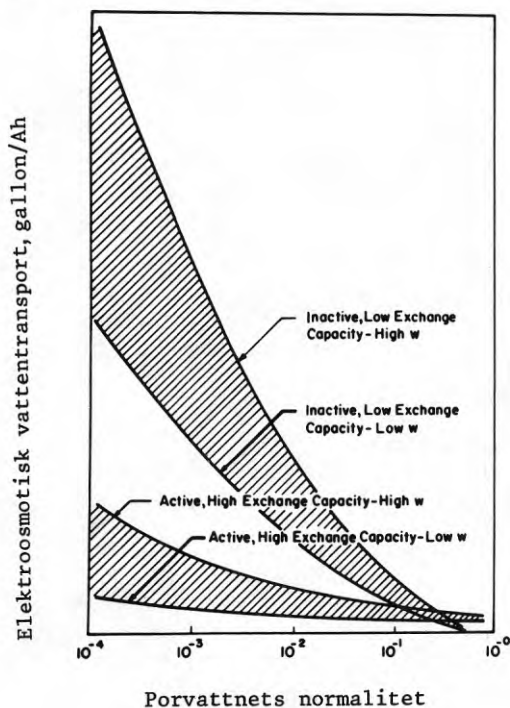


FIG.1. Schematisk förutsägelse om elektroosmos i olika leror enligt Donnan konceptet (Gray & Mitchell, 1967).
Schematic prediction of electroosmosis in various clays according to the Donnan concept (Gray & Mitchell, 1967).

4.2 Fri vattenströmning på grund av elektroosmos

Ett flertal forskare, Casagrande, Schaad m.fl. har visat att om en likspänning anbringas över en jordmassa där man har fri vattentillförsel till anoden och fri vattenavrinning från katoden kan vattenströmningen uttryckas genom sambandet

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

där v_x = strömningshastigheten i x-riktningen hos porvattnet till följd av elektroosmosen, m/s

k_e = elektroosmotisk permeabilitetskoefficient, m²/Vs

U_x = elektrisk spänning i x-riktningen, V

Totala vattentransporten kan uttryckas genom sambandet

$$Q_w = k_e \frac{U}{x} A t \quad (2)$$

där Q_w = transporterad vattenmängd under tiden, t, m³

$\frac{U}{x}$ = spänningsgradient, V/m

A = tvärsnittsarea, m²

t = tid, s

Genom insättning av

$$U = \rho \frac{x}{A} I$$

där ρ = jordresistivitet, Ω m

erhålls

$$Q_w = k_e \rho I t \quad (3)$$

Har man samtidigt med den elektroosmotiska vattenströmmen en hydraulisk vattenström blir

$$v_x = -k_e \frac{\partial U}{\partial x} - \frac{k}{g \rho_w} \frac{\partial u}{\partial x} \quad (4)$$

där k = hydraulisk permeabilitetskoefficient, m/s

u = porvattentryck, kPa

g = jordacceleration, m/s² (N/kg)

ρ_w = vattnets densitet, t/m³

Dessa formler är de klassiska uttrycken för elektroosmotisk vatten-transport och kan användas för beräkningar av vattenströmning i ett fält där vatten hela tiden fritt rinner till anoden och avgå vid katoden. I detta fall ger inte elektroosmosen upphov till några portrycksförändringar eller någon konsolidering.

4.3 Motverkan av hydraulisk gradient med elektroosmos

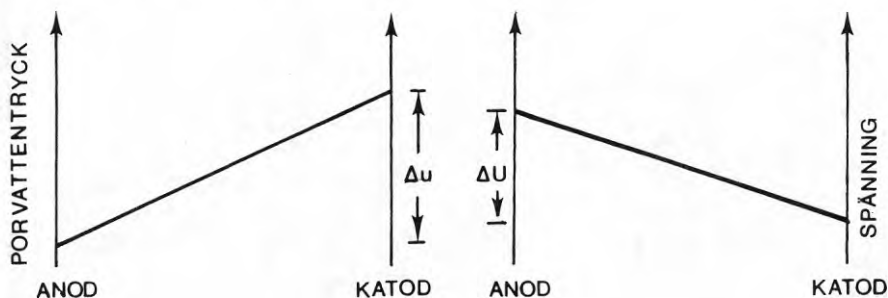
Formlerna kan också användas för beräkning av erforderlig elektrisk spänning för att den elektroosmotiska vattenströmningen skall motverka en hydraulisk.

Vid kombinerad, motriktad hydraulisk och elektroosmotisk vattenströmning får man vid jämviktsläget då hastigheten $v_x = 0$ att

$$k_e \frac{\Delta U}{\Delta x} = \frac{k}{g \rho_w} \frac{\Delta u}{\Delta x} \quad (5)$$

varav

$$\Delta u = \frac{k_e g \rho_w}{k} \Delta U \quad (6)$$



Denna metod att sänka grundvattenytan och motverka den hydrauliska gradienten vid schaktning har sedan länge med framgång tillämpats i utlandet och är väl etablerad.

4.4 Jordresistivitet

Jordresistiviteten ρ beror i huvudsak på lermineral, porositet och salthalten i porvattnet (Penner, 1965).

Konduktiviteten $\lambda (= \frac{1}{\rho})$ för en vattenmättad lera är inte summan av konduktiviteten i leran och konduktiviteten i porvattnet. Eftersom lerpartiklarna har negativ ytladdning attraheras positiva joner i porvattnet och bildar ett ledande skikt längs lerpartikelns yta.

Det har visats, att för en given por som är fylld med vätska och där de motstående väggarna är någorlunda parallella är

$$\lambda \text{ (porvätska)} + \lambda \text{ (leryta)} = \lambda \text{ (vätskefylld por)} \quad (7)$$

Faktorer som påverkar konduktiviteten och resistiviteten är alltså lerhalten, materialets strukturella uppbyggnad, ledningsförmåga i lerpartiklarnas ytskikt och porvätskans ledningsförmåga. Med ökande salthalt i porvätskan och minskande lerhalt minskar betydelsen av ledningsförmågan i lerytan.

4.5 Elektroosmotisk permeabilitetskoefficient

Den elektroosmotiska permeabilitetskoefficienten k_e har bestämts av olika forskare för ett mycket stort antal jordmaterial. Casagrande gjorde 1959 en sammanställning av utförda bestämningar och kom fram till ett medelvärde av $5 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{sV}$ som föreföll gälla för de flesta leror. Senare undersökningar av Gray & Mitchell (1967) visar att k_e beror på lermineral, vattenkvot och salthalt. En sammanställning av k_e -värden för olika leror visas i FIG. 2.

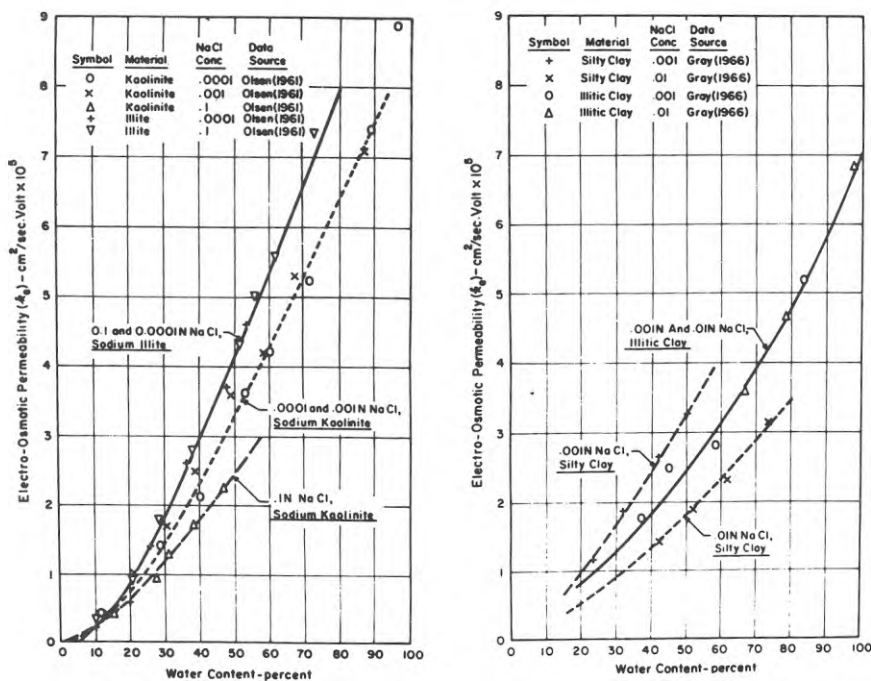


FIG.2. Variation av elektroosmotisk permeabilitet med vattenkvot och elektrolitkoncentration för olika leror (Gray & Mitchell, 1967).
Variation in electroosmotic permeability with water content and electrolyte concentration for various clays (Gray & Mitchell, 1967).

4.6 Elektroosmotisk konsolidering

Tidigare betraktelser är användbara för att bestämma vattentransport genom en lera på grund av elektroosmos. I fallet elektroosmotisk konsolidering transporteras däremot vatten ur ur en lera. Därvid minskar vattenkvoten och materialet konsoliderar.

Esrig (1968) har formulerat uttryck för elektroosmotisk konsolidering.

Uttrycken baseras på att den elektroosmotiska och hydrauliska vattentransporten kan superponeras, v_x konstant ger

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{k e \rho_w}{k} \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} = 0 \quad (8)$$

Denna ekvation kan lösas för olika randvillkor vid anod och katod för en jord utsatt för en likspänningsgradient.

FIG. 3 visar lösningen för tre typfall.

A Anod och katod är båda öppna för fri vattentillströmning

B Anoden stängd och katoden öppen

C Katoden stängd och anoden öppen

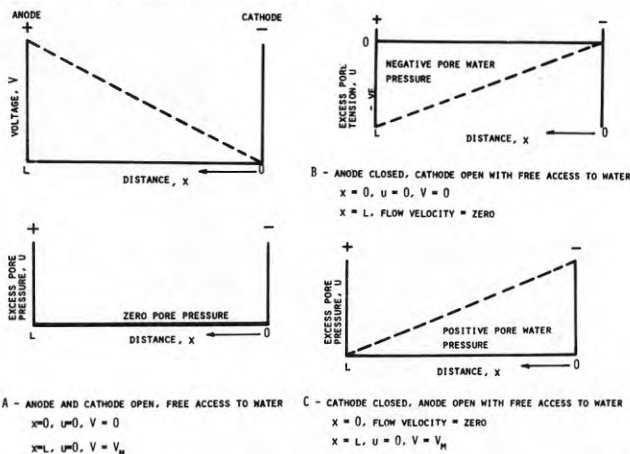


FIG 3 Distribution av elektrisk potential och portryck i inkompressibla system med olika randvillkor (Esrig, 1968). Pore pressure development in a uniform field (Esrig, 1968).

Fall A motsvarar fri vattengenomströmning genom jorden och innebär ingen konsolidering. Fall B motsvarar slutstadiet vid konso-

lidering av en lera där naturlig grundvattenyta ligger i markytan. Fall C motsvarar ungefär motverkan av en hydraulisk gradient med elektroosmos vid schaktning.

I fall B och C blir porvattentryckskillnaden Δu mellan anod och katod vid jämvikt.

$$\Delta u = \frac{k_e g \rho_w}{k} \Delta U \quad (9)$$

Den teoretiska storleken av porvattentrycksänkningen, som representerar den effektivtrycksökning som materialet konsoliderar för, är direkt proportionell mot spänningsfallet i materialet och förhållandet k_e/k .

Vid elektroosmotisk konsolidering i fält är tidsåtgången för konsolidering av avgörande betydelse. Som tidigare påpekats är porvattentrycksfördelningen i FIG. 3 representativ för slutstadiet då konsolideringen är avslutad. Eftersom totaltrycket är detsamma under behandlingen medför porvattentrycksänkningen en motsvarande effektivtrycksökning. För endimensionell konsolidering gäller

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} = k_e \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{k}{g \rho_w} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = m_v \frac{\partial u}{\partial t} = \frac{1}{M} \frac{\partial u}{\partial t} \quad (10)$$

där m_w = kompressibilitet och t = tid

$$c_v = \frac{k M}{g \rho_w} \quad (11)$$

Lösningen för konsolideringsekvationen för det vanliga fallet med öppen katod och stängd anod visas i FIG. 4. Tidsfaktorn T_v fås ur

$$T_v = \frac{c_v t}{B^2} \quad (12)$$

där B = elektrodavståndet

Enligt denna lösning skulle konsolideringstiden bero på den hydrauliska permeabilitetskoefficienten men inte alls på den elektroosmotiska k_e .

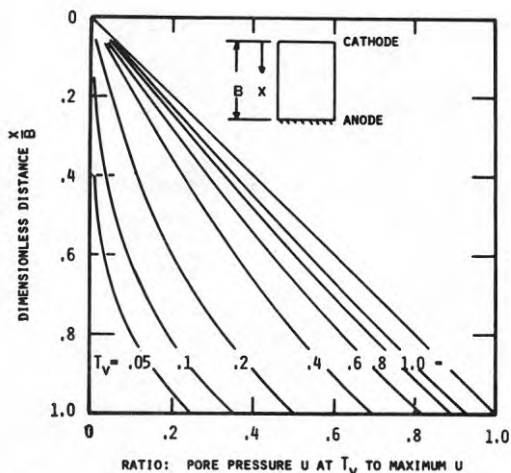


FIG. 4. Endimensionell konsolidering med elektroosmos, (Esrig, 1968). Distribution of pore pressure with time and distance, one dimensional consolidation, (Esrig, 1968).

4.7 Förändringar av leras egenskaper genom elektroosmos

När en likspänning appliceras till metallelektroder i en vattenmättad lera kan förutom vattentransport följande inträffa:

1. Jonbyten, 2. Jondiffusion, 3. Uppkomst av osmotiska och pH-gradienter, 4. Termofores på grund av upphettning av elektroder, 5. Mineralförändringar, 6. Utfällning av sekundära mineral, 7. Elektrolys, 8. Hydrolys, 9. Oxidation, 10. Reduktion, 11. Fysikalisk- och kemisk adsorption och 12. Strukturella förändringar. På grund av dessa effekter kan förändringar av leras egenskaper, som är svåra att beräkna och förklara, uppstå.

En förenklad förklaring till en del av dessa förändringar kan ges. Vid katoden utvecklas vätegas och en anrikning av OH^- joner sker. Detta förorsakar en ökning av pH-värdet. Positiva joner i lösning vandrar mot katoden där de i förening med OH^- bildar hydroxider. Esrig och Gemeinhardt visar att pH kan stiga till värden högre än 11 i närheten av katoden.

Vid anoden utvecklas syrgas genom hydrolys och negativa joner i lösning reagerar med de frigjorda vätejonerna och bildar syror. pH-värdet sjunker. Syrorna angriper merallen i anoderna och en förstärkning av leran i anodens närhet genom jonbyte blir följden. Det mest väldokumenterade försöket att konsolidera lera med elektroosmos i fält utfördes i Ås i Norge 1964, Bjerrum, Moum och Eide (1968).

FIG 5 visar förändringarna i lerans egenskaper efter elektroosmos.

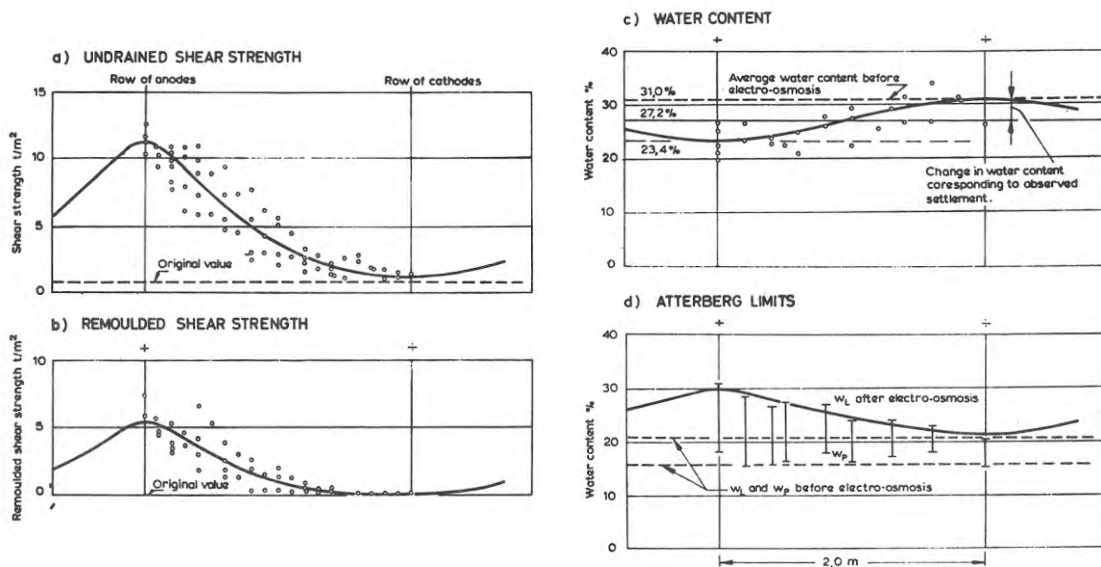


FIG.5. Effekt av elektroosmotisk konsolidering på egenskaperna hos en kvicklera i Ås, (Bjerrum *et al.*, 1968).
Effects of electroosmotic consolidation on the properties of a quick clay in Aas, (Bjerrum *et al.*, 1968).

Förändringarna i skjuvhållfasthet motsvarar teorin vad beträffar fördelningen mellan anod och katod. Medelökningen var dock 80 % högre än vad som motsvarande vattenkvotminskning förväntades ge.

Förändringen i vattenkvot motsvaras inte av sättningsskilderna eftersom hela fältet satte sig jämnt. Till förändringarna i Atterbergs gränser ges ingen förklaring.

Vid de försök med elektroosmos som utförts i Sverige (Hansbo, 1970) har ofta konstaterats kvicklerebildning vid katoden. Att så inte var fallet vid försöket i Ås beror förmodligen på att ursprungsmaterialet var en kvicklera.

Vid fältförsöken vid Östra sjukhuset i Göteborg (Hansbo, 1970) konstaterades att gasutvecklingen i ett snäckskalslager var så kraftig att en resulterande hävning uppstod.

4.8 Förändringar av leras egenskaper genom urlakning

En jämförelse med de förändringar som uppstår i lera vid elektroosmos och de förändringar av motsvarande leror som uppstår vid urlakning kan göras. Vid elektroosmos vandrar jonerna mot elektroderna, där de övergår i gasform eller reagerar med andra frigjorda joner. En förändring av saltdistributionen i jorden uppstår.

Torrance (1974) har visat att kvicklera kan bildas vid urlakning av en marin lera då salthalten nedbringats till under 2 g/l. FIG.6.

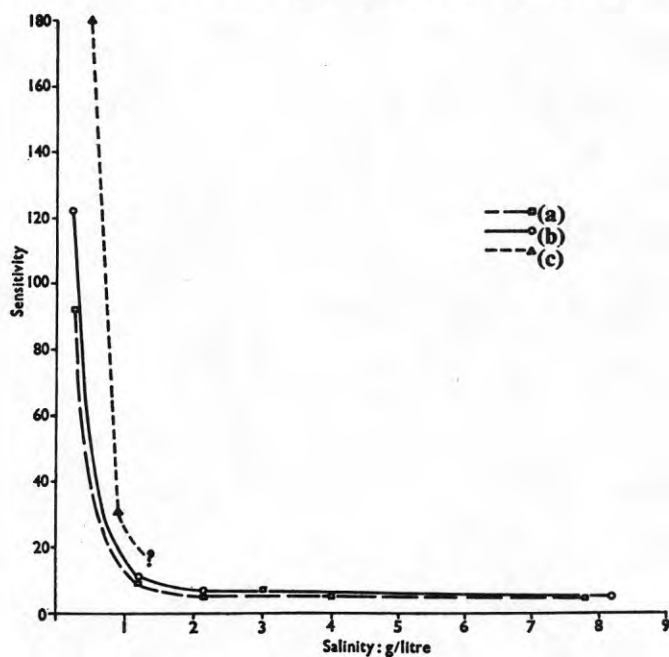


FIG.6. Sensitivitet som funktion av salthalt vid urlakning, (Torrance, 1974).

Salinity dependence of sensitivity, (Torrance, 1974).

Förkonsolideringstryck och skjuvhållfasthet sjunker när salthalten minskar, FIG.7.

Flytgräns och plasticitetsindex sjunker kraftigt då salthalten närmar sig noll, FIG. 8.

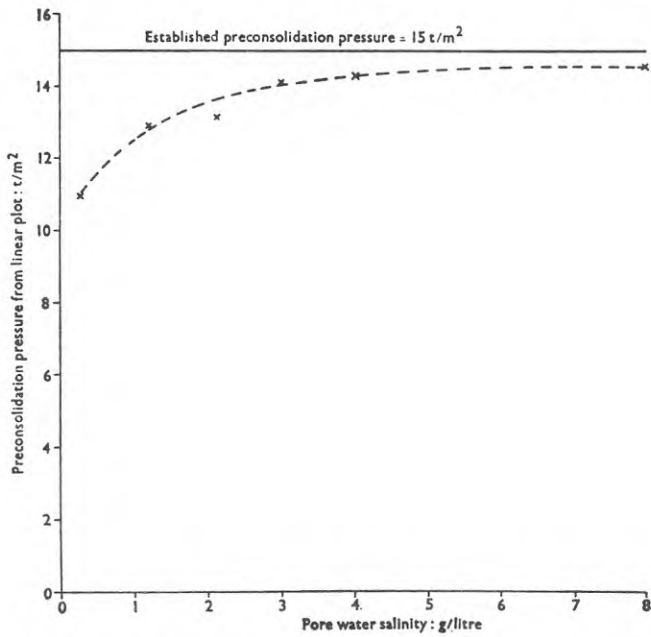


FIG.7. Förkonsolideringstryck som funktion av salthalt vid urlakning, (Torrance, 1974).
Preconsolidation pressure for leached overconsolidated marine clay, (Torrance, 1974).

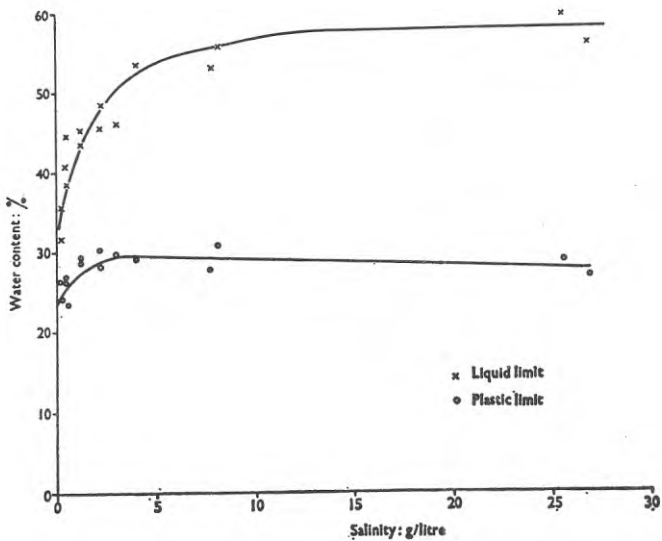


FIG.8. Atterbergs gränser som funktion av salthalt vid urlakning, (Torrance, 1974).
Salinity dependance of liquid and plastic limits, (Torrance, 1974).

4.9 Beräkning av övergångsresistans mellan elektroder och jord

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

$$R = \frac{\rho}{2\pi D} \ln \frac{4D}{d} \quad (13)$$

där D = elektrodslängd

d = elektroddiameter

Den totala övergångsresistansen R_n för n parallellkopplade elektroder i en elektrodslinje kan beräknas ur sambandet, (jfr Moun, 1967)

$$R_n = \frac{f}{n} R$$

där

$$f = 1 + \frac{\ln \left[(\cot \frac{\theta_2}{2}) \cdots (\cot \frac{\theta_n}{2}) \right]}{\ln \left(\frac{8D}{d} \right) - 1} \quad (14)$$

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

n = antalet elektroder i raden

s = elektrodavstånd

4.10 Anodförbrukning

Anodförbrukningen ΔG_a beräknas enligt Faradays lag

$$\Delta G_a = \frac{Q_e}{96500} \frac{\text{atomvikt}}{\text{valens}} (= 0.29 Q_e \text{ mg vid tvåvärdigt järn}) \quad (15)$$

Q_e = strömförbrukningen i anoderna, C (As)

Beräkningarna av övergångsmotstånd och anodförbrukning har visat sig stämma väl vid fältförsök.

4.11 Strömbegränsning

Fredén (1962) utförde försök för att utröna hur stor strömtäthet i elektrodytan som kunde tillåtas utan att det elektroosmotiska förloppet påverkades av uttorkning vid anoderna. Gränsvärdet för det aktuella materialet befanns ligga mellan 40 och 50 A/m². Som

allmän rekommendation ges att strömtätheten i elektrodytan ej bör överstiga 20 A/m^2 .

5 MÄTNING AV ELEKTROSMOTISKA PARAMETRAR. Apparatur och försöksmetoder

5.1 Jordresistivitetsmätning I

För att mäta resistiviteten hos jord används ibland en metod, där man lägger två metallplattor mot ändytorna av en jordcylinder. Metallplattorna ansluts till en likströmskälla varpå strömstyrka och potentialskillnad mäts. Eftersom övergångsmotståndet mellan metallplattor och jord ej kan försummas måste flera försök med olika provtjocklekar utföras.

Dessa försök fordrar mycket material och är osäkra då övergångsmotståndet varierar från försök till försök.

För att mäta resistiviteten i små lerprover tillämpas vid CTH en metod utarbetad av van der Pauw, (1958).

Utrustning

Provhållaren består av en plexiglas-cylinder med fast botten. Cylinderdiametern skall vara ett par millimeter större än provdiametern, 50 mm för kolvprovtagare. I cylinderns innerväggar finns fyra symmetriska spår för elektroder.

Elektroderna kan göras av mässing. De utformas som stavar med en profil så att de kan skjutas ned i spåren med styrning. Den kant av elektroden som skall vara i kontakt med provet utformas som en egg.

Elektrodernas tjocklek väljs så att eggen sticker ut 0,5-1 mm + halva diameterskillnaden mellan cylinderns innervägg och jordprovet.

Reglerbart likströmsaggregat
Amperemeter
Högohmig voltmeter

Montering

En jämntjock skiva av provet, vid kolvprovtagare 2 cm, placeras centriskt i provhållaren. Elektroderna skjuts ned i sina spår och

eggarna skall därvid ha full anliggning mot provet, dvs tränga in 0.5-1 mm i provet. Två närliggande elektroder kopplas i serie med ampèremetern till likströmsaggregatet. De andra två ansluts till voltmeteren.

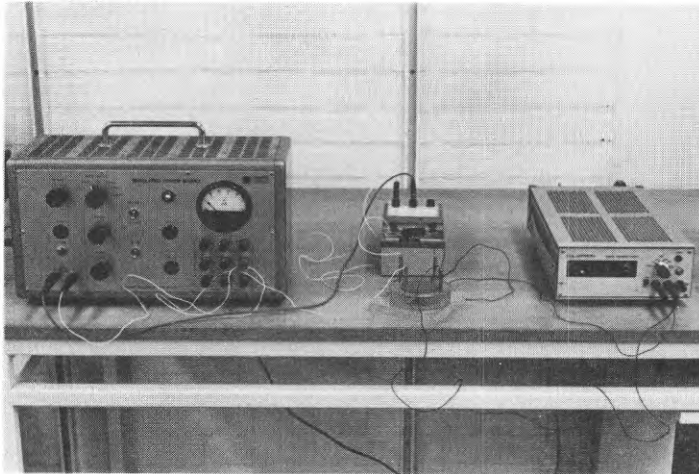
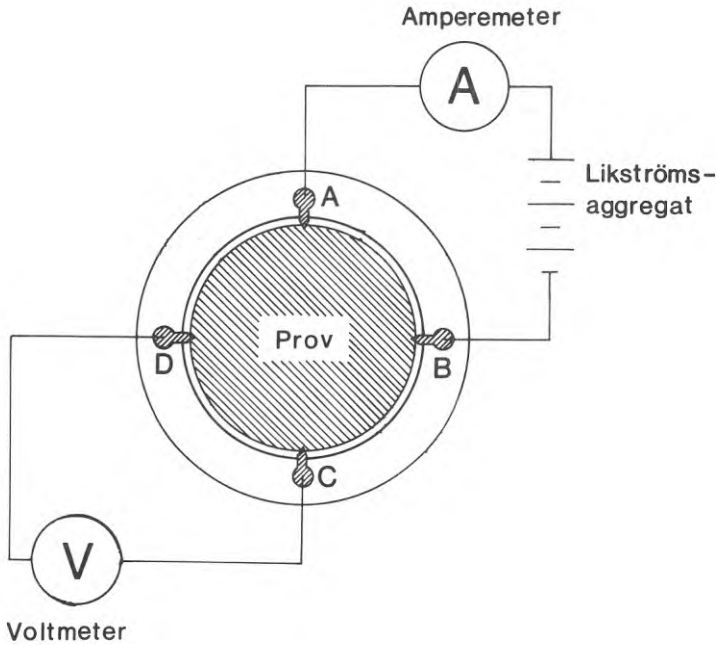


FIG.9. Apparatur för jordresistivitetsmätning.
Apparatus for measurement of soil resistivity.

Provning

Likströmsaggregatet ställs in på en spänning av max 5V och kopplas in. Strömstyrkan genom elektroderna A och B mäts samtidigt med spänningen mellan D och C. Resistansen $R_{AB, CD}$ definieras som potentialskillnaden $U_D - U_C$ mellan elektroderna D och C per ström-enhet genom elektroderna A och B.

Elektroderna kopplas om och $R_{BC, DA}$ mäts på motsvarande sätt.

Resistiviteten ρ beräknas med formeln

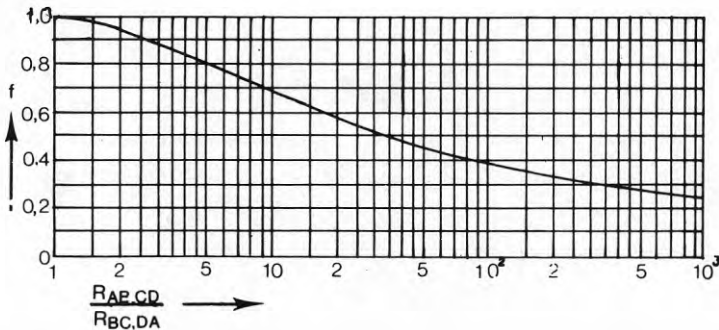
$$\rho = \frac{\pi h}{\ln 2} \left(\frac{R_{AB, CD} + R_{BC, DA}}{2} \right) f \left(\frac{R_{AB, CD}}{R_{BC, DA}} \right) \quad (16)$$

där h är provets höjd och f är en funktion av förhållandet $R_{AB, CD}/R_{BC, DA}$

$$\frac{R_{AB, CD} - R_{BC, DA}}{R_{AB, CD} + R_{BC, DA}} = f \operatorname{arc} \cosh \frac{e \frac{\ln 2}{f}}{2} \quad (17)$$

Om materialet är homogent och elektroderna symmetriskt placerade a kan f vanligen sättas till 1 då $R_{AB, CD} \approx R_{BC, DA}$.

I annat fall tas f ur diagram



Felkällor

Inhomogenitet hos provet som stör det elektriska flödet t.ex. siltskikt, snäckskal eller hål efter rottrådar i prov från ringa djup.

Dålig anläggning av elektroder.

Otillräcklig inre resistans i voltmetern. Inre resistansen måste vara så hög att strömmen genom voltmetern och därmed spänningsfallet på grund av övergångsmotståndet vid elektroderna kan försummas.

Polarisering av leran vid elektroderna.

Jordresistivitetsmätning II

Då man har litet större tillgång till jordmaterial och vill undvika inverkan av små inhomogeniteter kan en annan metod användas.

Vid denna metod placeras en jordcylinder mellan två metallplattor som ligger an mot ändytorna. En bit från ändytorna anbringas två metallklämmor. Metallplattorna ansluts till ett reglerbart likströmsaggregat och en ström passerar genom provet. Spänningen mellan metallklämmorna mäts med en höghög voltmeter.

Utrustning

Provhållaren består av bottenplatta av plexiglas med två fasta gejdtrar. I plattan finns en ursvarvning där den undre metallplattan ligger. Ovan ursvarvningen sitter klämman som består av två ledade metallstycken som är inbördes kortslutna. På gejdtrarna löper överplattan som också är en plexiglasplatta med ursvarvning, metallplatta och klämma.

Montering och provning

Materialet i en kolprovtagarhylsa trycks ut och ett par centimeter i var ända kapas bort. Provet placeras centriskt på bottenplattan och den undre klämman anbringas. Överplattan förs ned tills metallplattan får kontakt med provet och den övre klämringen anbringas. Metallplattorna kopplas i serie med ampèremetern till likströmsaggregatet. Klämmorna ansluts till voltmetern. Likspänningen regleras så att strömstyrkan blir några milliampere och voltmetern avläses. På grund av gasutveckling vid metallplattorna blir inte strömmen riktigt konstant utan flera avläsningar får göras. Efter någon minut omkastas strömriktningen och nya mätningar görs. Mätningarna utförs tills ett säkert medelvärde erhållits.

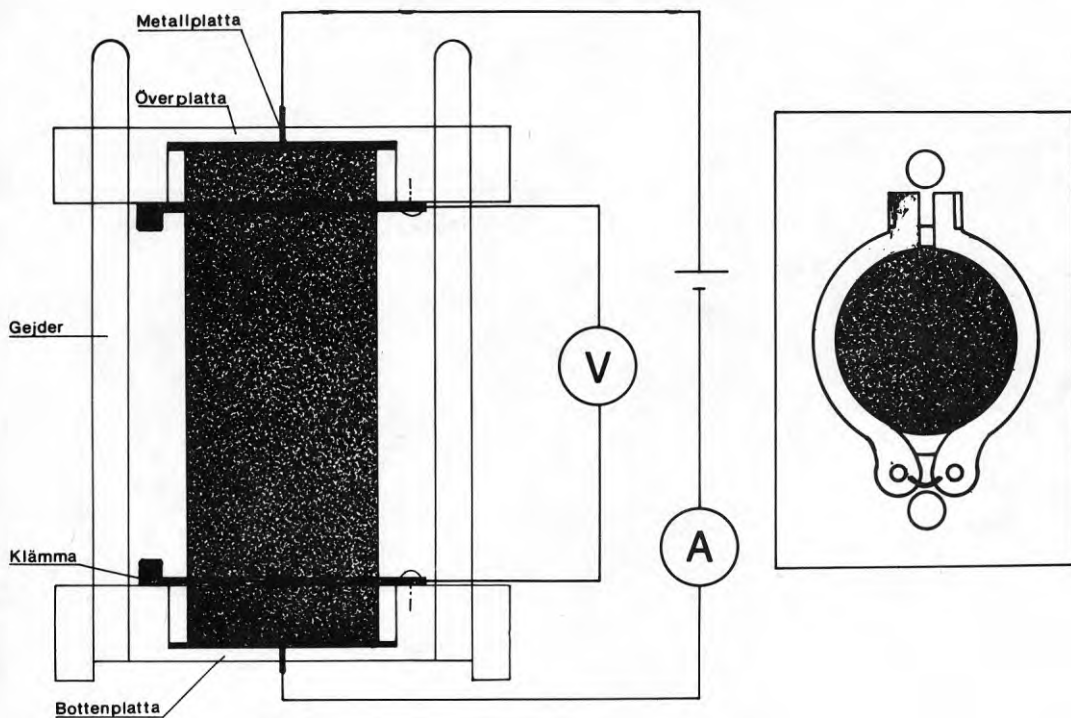


FIG. 10. Apparat för mätning av jordresistivitet.
Apparatus for measurement of soil resistivity.

Resistiviteten urvärderas genom

$$\frac{U}{I} = \frac{\rho \cdot l}{A} \quad (18)$$

där U = spänning mellan klämmor, V

I = strömstyrka, A

l = avstånd mellan klämmor, m

A = provets tvärsnittyta, m^2

ρ = resistivitet, Ωm

5.2 Bestämning av elektroosmotisk permeabilitet

I samband med försök med elektroosmotisk avvattning vid Östra sjukhuset i Göteborg konstruerades en elektroödometer för laborieförsök.

Ödometern används för att mäta den elektroosmotiska permeabiliteten

i rekonsoliderade jordprover.

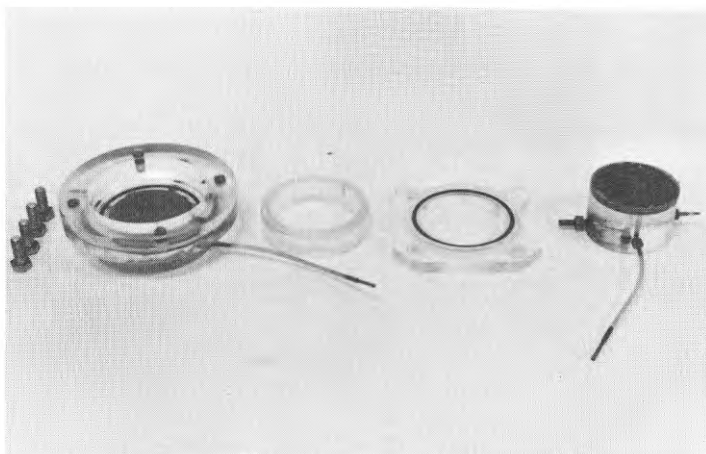
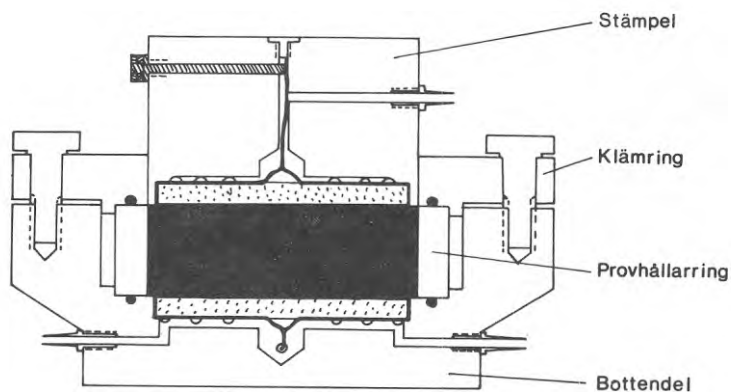


FIG.11. Elektroödometeter.
Electrooedometer.

Ödometern är utförd i polerat plexiglas så att provet kan studeras under försöket och gasutveckling iakttas. Den består av fyra delar.

Bottendelen har ett inbyggt glasfilter som är omslutet av ett finmaskigt platinanät. Nätet tjänstgör som elektrod och är kopplat till en utgående kabel. Från filtrets undersida går två borrarade kanaler till utvändiga slanganslutningar. En o-ring är infälld i bottendelen som tätning mot provhållarringen.

Provhållarringen har samma innerdiameter som kolvprovtagarhylsan

och är 20 mm hög.

Klämringen har ett centriskt hål där stämpeln skall gå igenom med passning. Ringen fästs med fyra bultar i bottendelen. I ringens undersida är en o-ring infälld. Då klämringen dras fast i bottendelen med provhållarringen insatt skall o-ringarna täta.

Stämpeln har ett inbyggt glasfilter omslutet av ett platinanät. Nätet tjänstgör som elektrod och är kopplat till en utgående kabel. Från filtrets översida går två borrade kanaler till utvändiga slanganslutningar. Passningen mellan stämpel och klämring skall vara sådan att ett lager silikonfett på stämpelns utsida tätar för små tryck.

Ödometern är konstruerad för att placeras i stativet till ödometer SGI X. Vertikaltryck på provet påförs som vid vanliga ödometerförsök.

Montering

Filtren i bottendel och stämpel ansluts via kanaler och slangar till var sin byrett. Systemen genomspolas med destillerat vatten och vattenmätas. De slangar som inte är anslutna till byretter pluggas.

Provet trycks ur provhylsan in i provhållarringen och skärs av med tråдавskärare jäms med ringens över- och undersida så att ringen blir precis fylld. Provet placeras på filtret i bottendelen och klämringen läggs på och dras fast. Stämpeln förses med ett tunt lager silikonfett på sidoytan. Hålet i klämringen fylls med destillerat vatten så att ingen luft skall pressas in i stämpelfiltret då stämpeln förs ned. Stämpeln anbringas försiktigt och ödometern ställs in i belastningsstativet. Provet belastas och får konsolidera som vid kompressionsförsök upp till rådande effektiva överlagringstrycket på provets nivå i fält.

Provning

Provhöjden låses.

Byretterna justeras så att ingen hydraulisk gradient ligger över provet.

Elektrodena kopplas i serie med en amperemeter och ett skjutmot-

stånd till ett likströmsaggregat.

Likspänningen kopplas in och skjutmotståndet regleras så att önskad strömstyrka går genom provet. Lämplig strömstyrka kan ej bestämmas i förväg utan man börjar med förslagsvis 1 m A genom provet och ökar sedan strömstyrkan successivt. På så sätt kan man kontrollera att man får ett linjärt förlopp och märker om gasutvecklingen blir så kraftig att vattenströmningen hindras.

Byretterna justeras fortlöpande så att ingen hydraulisk gradient uppkommer över provet.

Byretterna läses av vid bestämda tidsintervall.

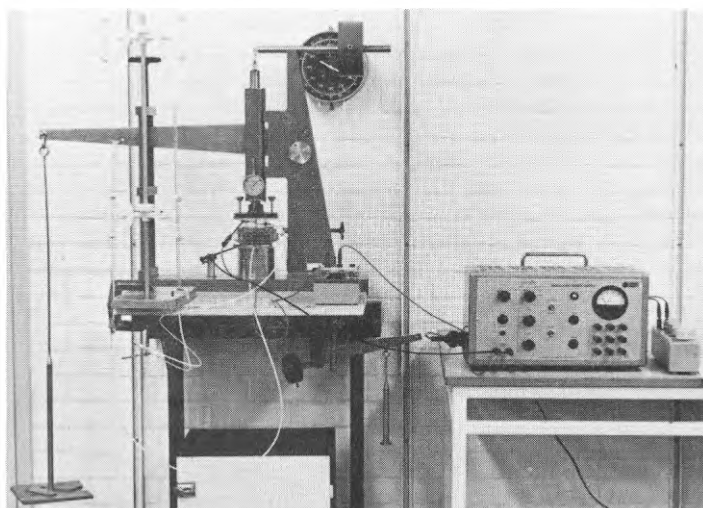
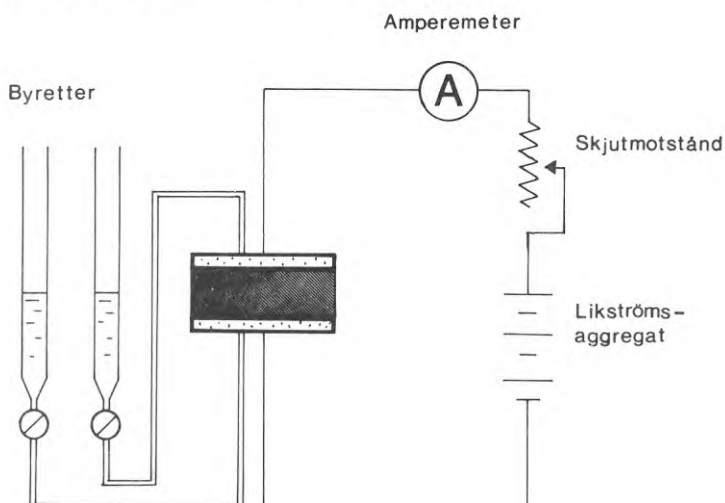


FIG.12. Apparatur för bestämning av elektroosmotisk permeabilitet.
Apparatus for determination of electroosmotic permeability.

Då gasbubblor börjar uppträda i systemet skall försöket avbrytas och kanalerna spolras.

Byrettavläsningarna måste justeras med hänsyn till gasutvecklingen vid elektroderna. Om porvattnet består av rent vatten utvecklas för 96 500 As 11,2 l gas vid katoden och 5,6 l gas vid anoden. Detta är ej helt korrekt då porvattnet innehåller diverse salter men en närmare analys är svår och erhållna försöksresultat visar på en godtagbar överensstämmelse med de uppgivna värdena.

Beräkning

Elektroosmotiska permeabilitetskoefficienten beräknas enligt

$$k_e = \frac{Q_w}{\rho t I}$$

där k_e = elektroosmotisk permeabilitetskoefficient, m^2/sV

Q_w = genomströmmad vattenmängd, m^3

ρ = jordresistivitet, Ωm

t = genomströmningstid, s

I = strömstyrka, A

Då provhöjden är låst under själva provningen och vatten kan strömma till anoden sker ingen konsolidering.

5.3 Elektroosmotisk konsolidering

För att få en uppfattning om den avvattningseffekt man kan få i fält genom elektroosmos kan man utföra laboratorieförsök i elektroödometern.

Montering

Filtren i bottendel och stämpel torkas. Provet trycks ur provhylsan in i provhållarringen och skärs av med trådavskärare jäms med ringens över- och undersida så att ringen blir precis fylld. Provet placeras på filtret i bottendelen och klämringen läggs på och dras fast. Stämpeln förses med ett tunt lager silikonfett på sidoytan. Stämpeln anbringas försiktigt på provet och ödometern ställs in i belastningsstativet. Provet belastas och får konsolidera som vid

kompressionsförsök upp till rådande effektiva överlagringstrycket på provets nivå i fält.

Provning

Efter att provet konsoliderat låter man lasten ligga på.

Elektrodena kopplas i serie med en amperemeter och ett skjutmotstånd till ett likströmsaggregat. Därvid tillses att den undre elektroden blir katod och den övre anod. Likströmmen kopplas på och skjutmotståndet regleras så att önskad strömstyrka går genom provet.

Strömstyrkan hålls konstant med hjälp av skjutmotståndet och provets kompression avläses med jämna tidsintervall.

Vid uppritning av tid- sättningskurvan (se FIG.13) finner man att sättningen till en början är mycket liten men efter en stund ökar den kraftigt. Detta beror på att det vid försökets början finns vatten kvar i filterstenen vid anoden. Först sedan detta vatten strömmat genom provet och anoden blivit torr startar konsolideringsprocessen.

Försöket får pågå till tid- sättningskurvan börjar plana ut och avvattningsprocessen i det närmaste är avslutad.

Beräkning av parametrarna redovisas i avsnitt 7 "Diskussion av försöksresultaten och slutsatser".

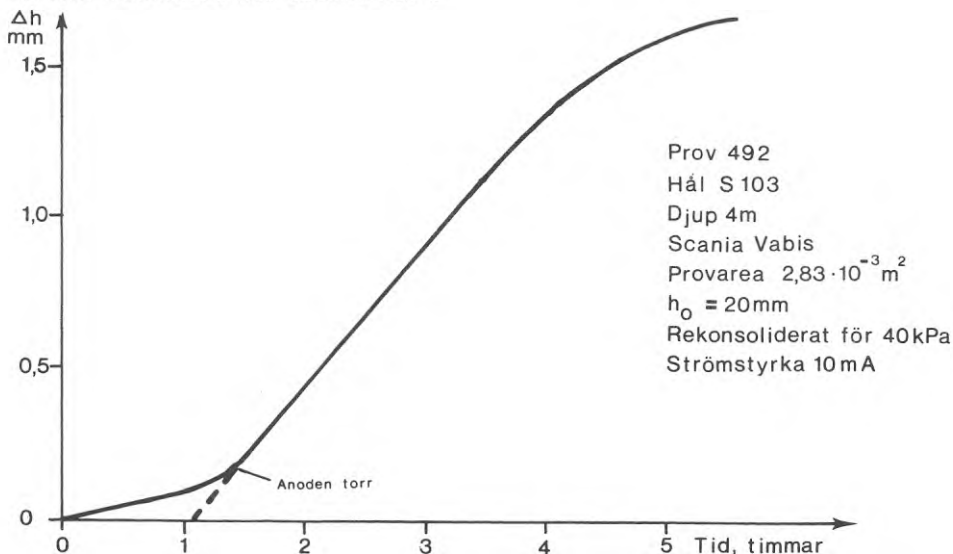


FIG.13. Resultat från ett konsolideringsförsök.
Results from a consolidation test.

5.4 Modellfält

För att laboratoriemässigt kunna studera effekten av elektroosmotisk konsolidering av lera vid olika randvillkor har ett modellfält byggts. Modellfältet är tillverkat av 20 mm plexiglas. Det består av fyra delar; bottenplatta, provhållare, gummimembran och lock.

Bottenplattan består av en plan skiva 340 x 460 mm med pålimmade förstyvningar på undersidan. Fjädrarna tjänstgör som underlag och förstyvningar. I bottenplattan sitter fem stycken portrycksmätare. Dessa består av tryckgivare, typ Kyowa, som är ingjutna i plexiglasblock. Blocken är limmade på undersidan av bottenplattan och kanaler är borrarade genom plattan till tryckgivarna. I kanalernas överdel ligger sand-aralditfilter i plan med bottenplattans överyta. I bottenplattan finns också fem genomgångar för mätelektroder. Mätelektroderna är av platina, 1 mm i diameter, och trycks in 20 mm i provet. Genomgångarna är försedda med o-ringstättningar.

Provhållaren har ett rektangulärt tvärsnitt med innermått 210 x 340 mm. Höjden är 160 mm. Ändytorna är planfrästa. På utsidorna är förstyvningar limmade. Provet har från början en höjd av 120 mm.

Gummimembranet är av paragummi. Det är lådformigt med botten 210 x 340 mm. Lådväggarna är 55 mm höga och är utkragade 50 mm. I ändarna av gummimembranets botten sitter elektrodhållare med genomföringar för 10 elektroder vardera. Avståndet mellan elektroderna i en rad är 20 mm och avståndet mellan elektrodraderna 300 mm. Elektrodhållarna är av vävbakelit. Elektroderna är av platina och är utformade som rör med ytterdiameter 2 mm och innerdiameter 1 mm. De är 150 mm långa varav 100 mm sticks ned i provet. Elektroderna är pluggade och spetsade i nederändan och varje elektrod är perforerad med 50 tvärgående 0,25 mm hål inom den del som sticks ned i provet. Genomgångarna i elektrodhållaren är försedda med o-ringstättningar. På gummimembranets botten är fem stycken mässingsplattor ϕ 20 mm fastlimmade. Dessa utgör mätpunkter för deformationsmätning.

Locket har formen av en upp- och nedvänd låda. Utvändigt är för-

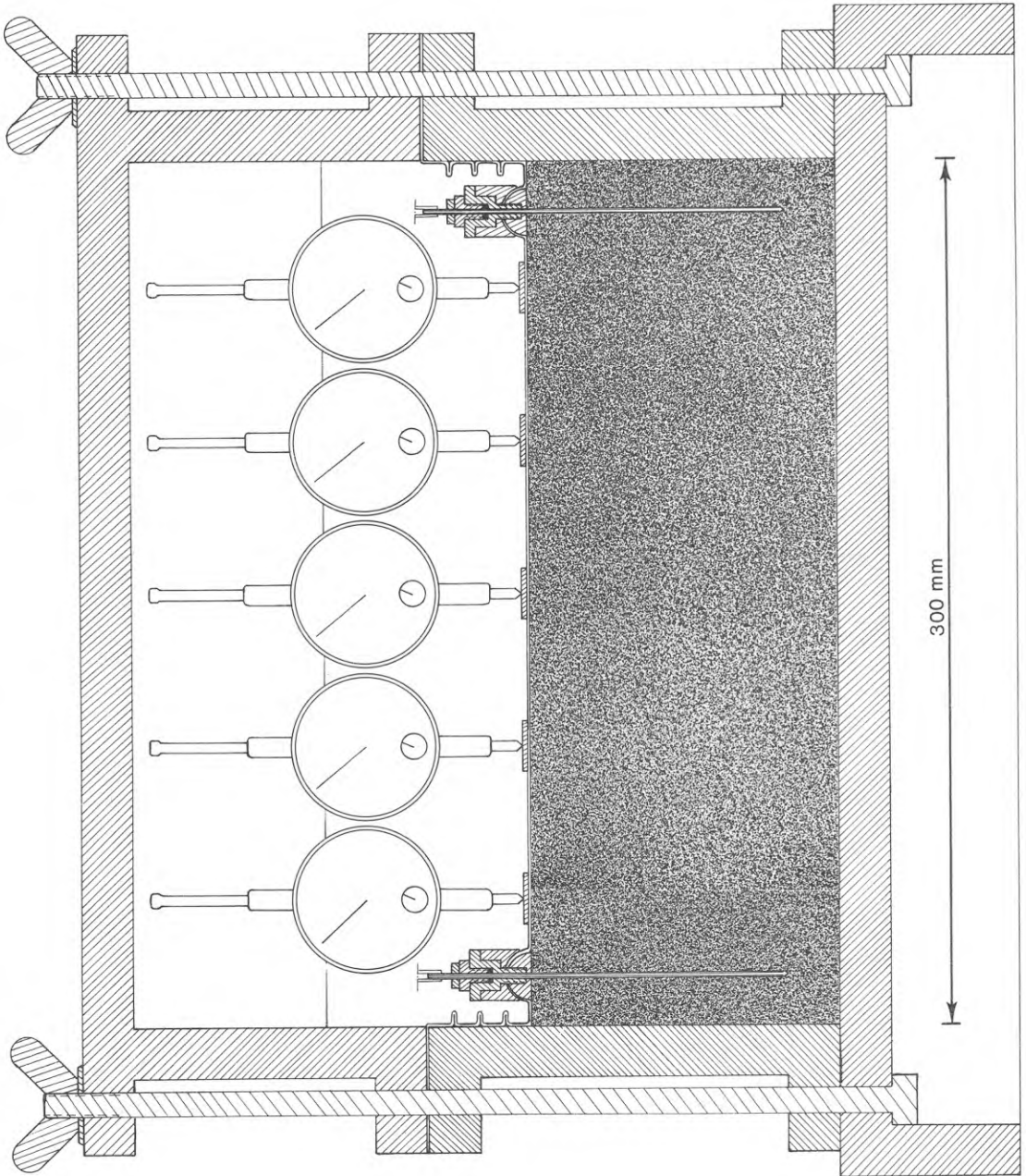


FIG.14. Modellfält
Model field

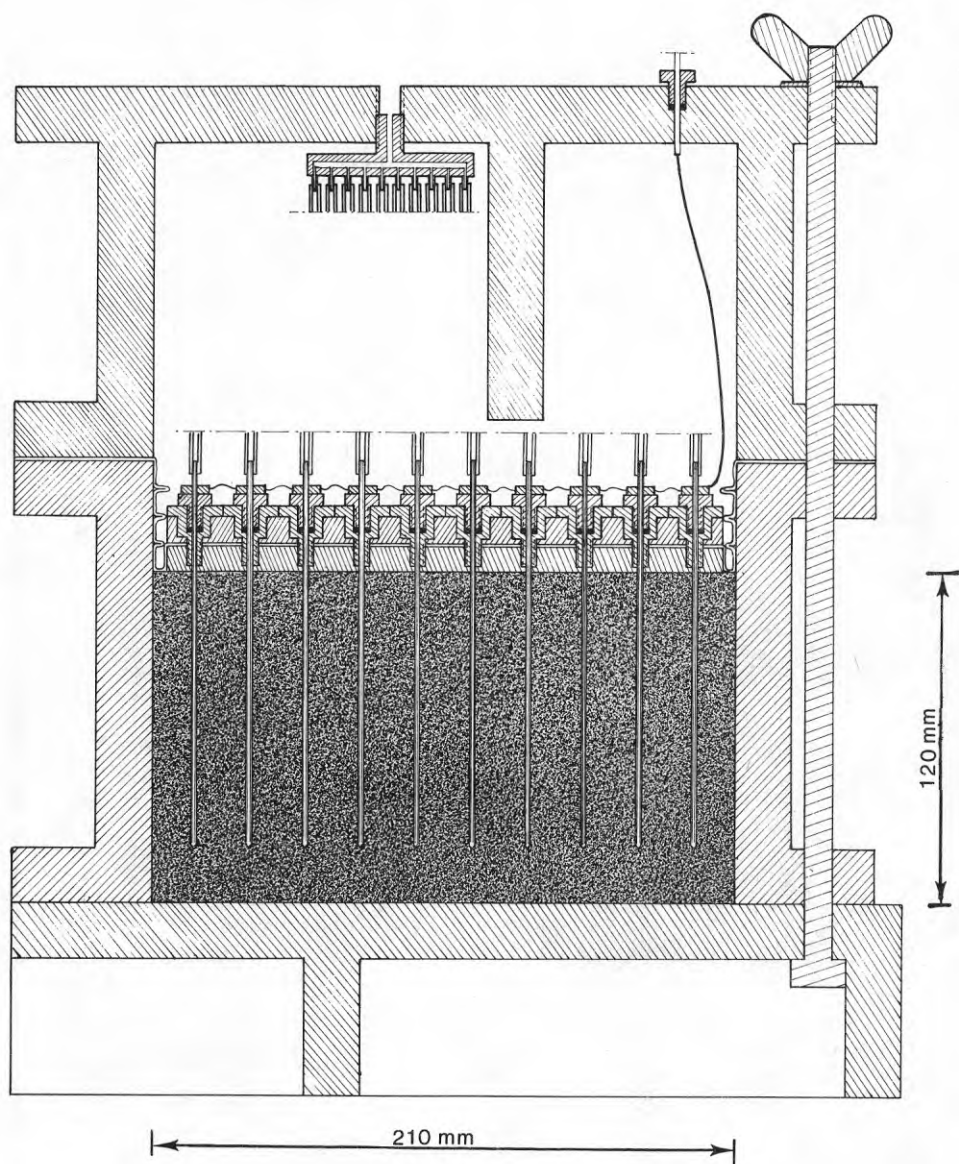


FIG.15. Elektrograd
Row of electrodes

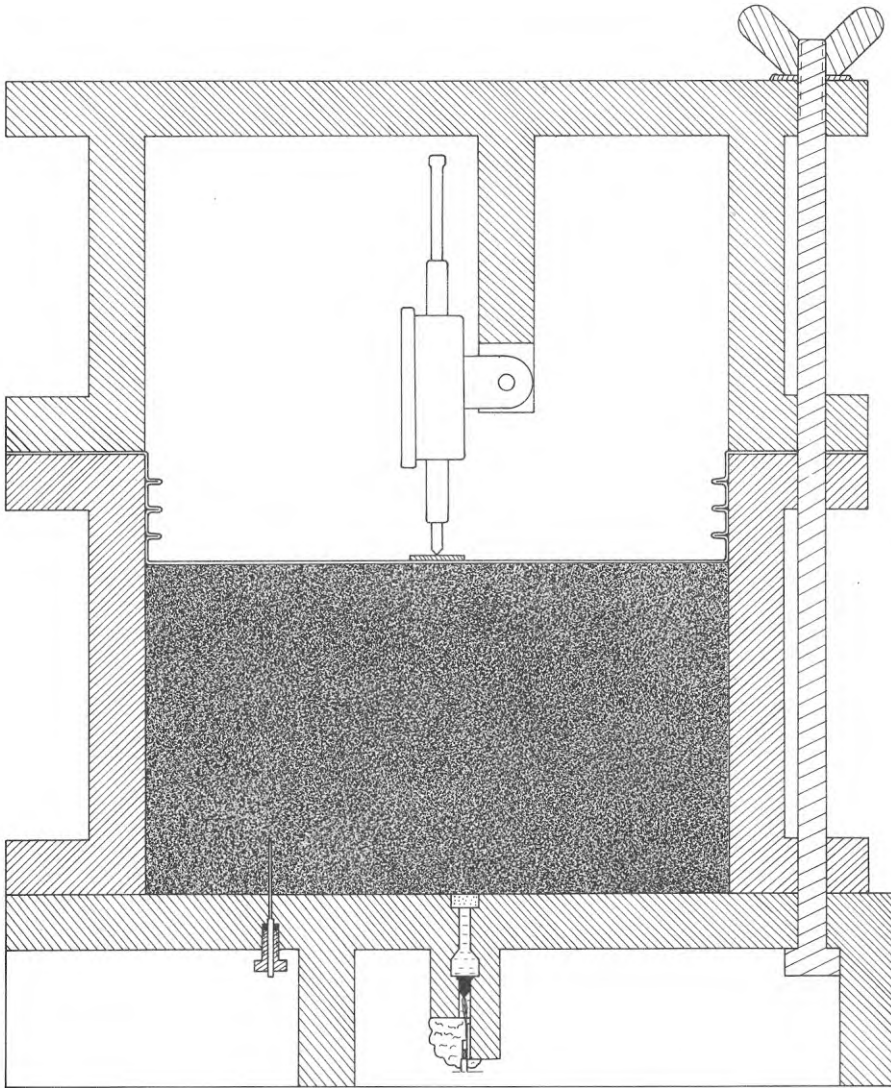


FIG.16. Mätsektion
Measurement section

styvningar limmade och invändigt en längsgående vägg som fungerar som förstävning och hållare av mätklockor. Lockets underkant är planfräst. På den invändiga väggen är fem mätklockor med slaglängden 30 mm fastskruvade. Klockornas fjädrar är borttagna så att inte spindlarna skall belasta provet. I lockets överplatta finns två kopplingsplintar för vardera tio slangar som skall anslutas till var sin elektrodrad. Kopplingsplintarnas utlopp går genom locket via slangar till en byrett som kan anslutas till ett "back pressure". I överplattan finns också två genomföringar med o-ringstättningar för elkablar till elektroderna och en tryckluftsanslutning.

De olika delarna sammanhålls av mässingbultar. Mellan locket och provhållaren tätar gummimembranets krage och mellan provhållaren och bottenplattan räcker det tack vare planfräsningen med ett lager silikonfett som tätning.

5.5 Tillverkning av prover för modellfält

Då vi i dag inte har någon bra metod att ta upp tillräckligt stora ostörda lerprover och önskemålet dessutom i detta fall var mycket homogena prover, tillverkades dessa på laboratoriet.

Leran hämtades från djupa schaktgropar. Den togs med grävskopa och lastades i plastbehållare för vidare transport till laboratoriet. Där finfördelades den för hand under tillsättande av vatten med önskad salthalt. I samband med finfördelningen plockades eventuella snäckskal, stenar, torrskorpebitar och liknande bort.

Materialet vispades därefter med en hushållsmixer tills inga klumpar kunde urskiljas. Inblandning av luftblåsor undveks så gott som möjligt.

Konsolideringsödometern är tillverkad i 20 mm plexiglas. Den består av bottenplatta, provhållare, lock, gummimembran, tryckplatta och filterstenar.

Bottenplattan består av en plan skiva med måtten 570 x 420 mm. På dess undersida är förstävningar pålimmade. I bottenplattan finns två dräneringshål med slanganslutningar.

Fig 18 KONSOLIDERINGSÖDOMETER

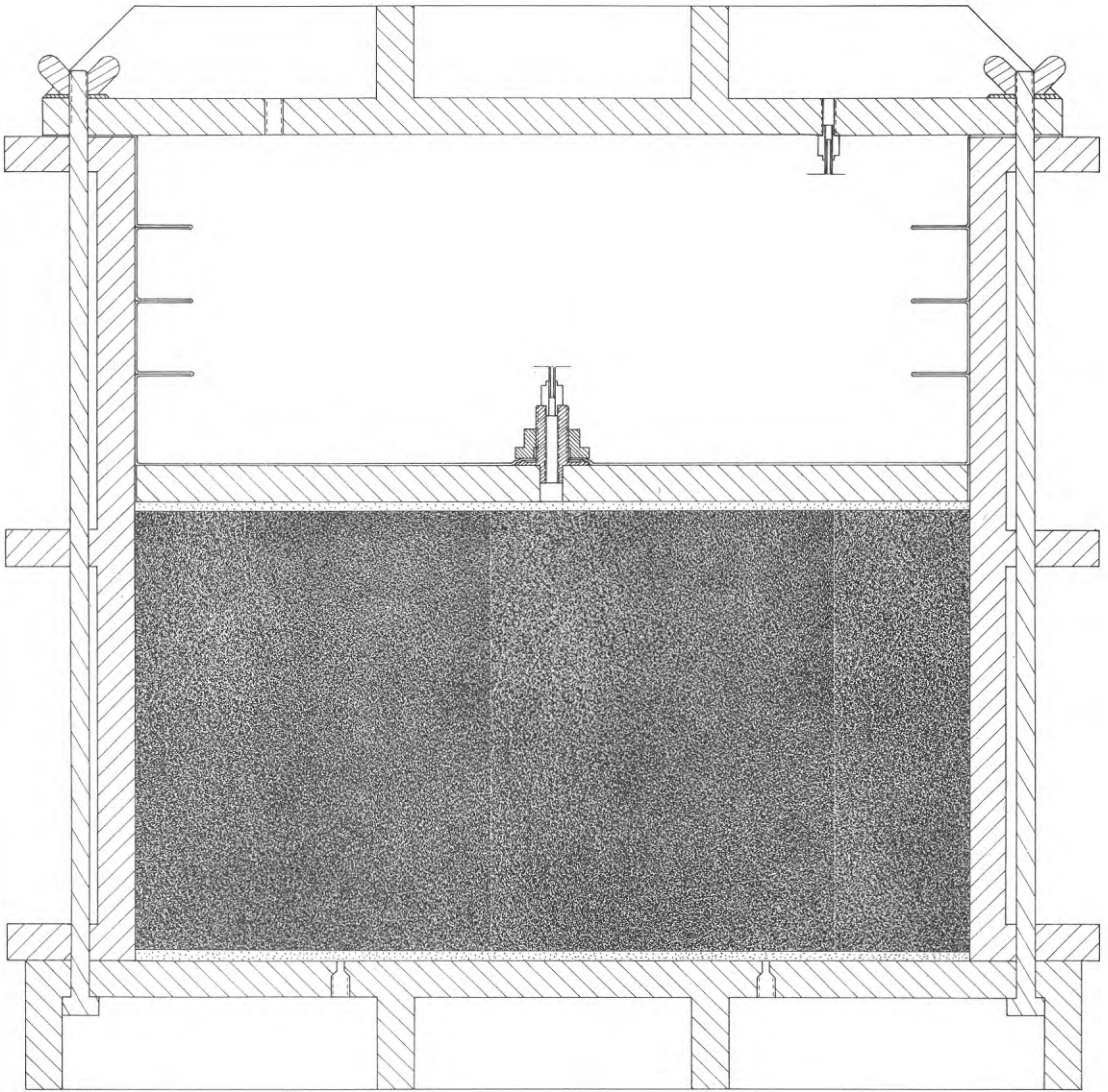


FIG.17. Konsolideringsödometer
Consolidation oedometer

Provhållaren har ett rektangulärt tvärsnitt med innermått 450 x 300 mm och är 450 mm hög. Ändytorna är planfrästa och på utsidan är förstävningar limmade.

Locket består av en plan skiva 550 x 400 mm med förstävningar på ovansidan. I locket finns två genomföringar, en med tryckluftsanslutning på ovansidan och en med anslutning för dräneringsslang på ovan- och undersidan.

Gummimembranet är av paragummi. Det är lådformigt med utkragade väggar. Membranets botten är 450 x 300 mm och väggarna är 350 mm höga. Centriskt i membranets botten finns en genomföring med slanganslutning.

Tryckplattan är en plan skiva med måtten 448 x 298 mm. Centriskt i tryckplattan är ett hål borrat.

Filterstenarna är av carborundum-araldit. De har måtten 450 x 300 x 5 mm.

Delarna hålls ihop av mässingbultar. Mellan lock och provhållare tätar gummimembranets utkrågning och mellan provhållare och bottenplatta ett lager silikonfett. Maximala konsolideringstrycket är 50 kPa.

Provtillverkning i konsolideringsödometern

Provhållarens underkant beläggs med ett tunt lager silikonfett och provhållare och bottenplatta bultas ihop. Bottenplattans dräneringshål ansluts med slangar till vattenbehållare som höjs upp så att vatten strömmar in i provhållaren och får stiga ca 5 mm över botten. En vattenmättad filtersten läggs ned i provhållaren. Lervällingen öses ned i provhållaren med en skopa. Om lervällingen består av flera satser tar man en skopa av var sats och rör om med hushållsmixer. När provhöjden blivit 300-350 mm läggs den andra vattenmättade filterstenen försiktigt på provet och vattenbegjuts så att ingen uttorkning kan ske. Provet får nu stå ett par timmar och "gela". Efter "gelningen" förs tryckplattan ned på den övre filterstenen och därefter gummimembranet. Genomföringen i gummimembranet ansluts med en slang till slanganslutningen i locket

och detta läggs på. Konsolideringsödometern bultas samman och provet är monterat.

Dräneringsslangarna från botten och lock leds till ett mätglas och trycket i konsolideringsödometern kopplas på. Tryckpåläggningen sker med hjälp av tryckluft och en noggrann reduceringsventil. Tryckluften kommer in genom tryckluftsanslutningen i locket och verkar på gummimembranet. Trycket höjs successivt i små steg så att det tar ett par dagar tills fullt konsolideringstryck uppnåtts. Materialets sammanpressning mäts genom avläsning av den utpressade vattenmängden i mätglaset. Volymändringen uppritas i tid- sättningsdiagram och trycket får ligga på tills kurvorna indikerar att materialet har konsoliderat. Normal konsolideringstid är en månad.

Uttagning av prov och montering i modellfält

När provet har konsoliderat i konsolideringsödometern kopplas dräneringsslangarna bort och trycket släpps. De långa bultarna tas bort och ersätts av fyra korta som endast håller ihop bottenplatta och provhållare. Locket och membranet avlägsnas. Ödometern vänds nu upp och ned och placeras på en piedestal så att hela massan vilar på tryckplattan. Piedestalen skall vara så hög att det är minst 145 mm frigång under provhållaren. De korta bultarna och bottenplattan tas bort och provhållaren pressas ned 25 mm. Den del av provet som nu sticker upp ur provhållaren skärs av med tråдавskärare och tas bort tillsammans med filterstenen. Provhållaren pressas ned ytterligare 120 mm och fixeras. Prover tas i materialet genom att tunnväggiga rostfria stålrör med en egg sticks ned vertikalt i provet. Denna provtagning görs efter två kanter så att ett ostört block av provet på 210 x 340 x 120 mm återstår.

Provtuberna grävs fram försiktigt och provet skärs med tråдавskärare så att ett block som är 210 x 340 x 120 mm sticker upp ur provhållaren.

Modellfältets bottenplatta bestryks med silikonfett, kanalerna till portrycksmätarna vattenfylls och de vattenmättade filtren sätts på plats. Modellfältets provhållare förs ned över det uppstickande provblocket tills de båda provhållarnas ändtytor ligger an mot varandra. Provet skärs av genom att en tråдавskärare upprepade gånger

förs längs den mindre provhållarens underyta. Modellfältets provhållare förs nu med det avskurna provblocket horisontellt åt sidan tills den är helt fri och vänds ett kvarts varv. Den planfrästa kanten torkas ren från lera och bestryks med silikonfett innan provhållaren placeras i läge på modellfältets bottenplatta.

Gummimembranet placeras på provet och elektrodhållarna fixeras i rätt läge med klämmor. Elektroden trycks ned genom genomföringarna så att de sticker ned 100 mm i provet och o-ringstätningarna drages åt.

Locket hängs upp strax ovan provhållaren så att man kommer åt att ansluta elkablarna till elektrodraderna och att koppla slangar mellan elektroden och kopplingsplintarna i locket innan det läggs på.

Modellfältet bultas ihop. Genom bottenplattan trycks nu de små mätelektroden så att de sticker in 20 mm i provet och genomföringarna tätas.

Försöksutförande

Utrymmet mellan locket och gummimembranet ansluts via manometer och reduceringsventil till tryckluft. Därigenom kan vertikalktrycket på provet regleras. Dräneringsslangarna från elektrodraderna ansluts via en specialbyrett, manometer och reduceringsventil till tryckluft. Genom reglering av trycket i dräneringsledningarna kan porvattentrycket regleras.

Det önskade vertikalktrycket och porvattentrycket påförs. Sättningsklockor och portrycksmätare läses av och eventuella tryckjusteringar för att få ett stabilt tillstånd görs. Denna stabilisering tar normalt en vecka.

Elektrodraderna ansluts nu i serie med en amperemeter till ett reglerbart likströmsaggregat och strömstyrkan regleras till önskat värde. Vill man kombinera elektroosmos med grundvattensänkning sänks samtidigt trycket i dräneringsledningarna.

Sättningsklockor, portrycksmätare, potentialfall och byretten läses av kontinuerligt och strömstyrkan hålls konstant.

Efter försöket demonteras locket, elektroderna och gummimembranet. Elva stycken delprover tas genom att provtuber pressas ned i provet och sedan grävs fram.

På grund av kravet på homogenitet och kontroll av alla material-egenskaper valdes att utföra försöken på laboratorietillverkade prover. För att få en naturlig mineralsammansättning och kornfördelning hämtades leran från djupa schakter. Det togs antingen med grävmaskin eller handschaktades. Transport till laboratoriet och förvaring skedde i plastbehållare.

I laboratoriet finfördelades materialet för hand och alla störande partiklar som stenar, skal och torrskorpebitar plockades bort. Vatten och koksalt tillsattas och blandningen rördes till en jämn smet med hjälp av hushållsmixer. Omrörningen pågick så länge synliga klumpar kunde upptäckas i blandningen. Stor aktsamhet iaktogs för att inte röra ned luft i blandningen. Efter omrörningen konsoliderades materialet i konsolideringsödometern.

Ursprungsmaterialet till försöksmaterialen Eol-6, 8 och 9 togs i schaktgroppar i närheten av Hjalmar Brantingsplatsen i Göteborg. Tagningsnivån var ca 4 m under markytan, dvs väl under torrskorpan. Materialet är en salt marin lera och har en mineral- och kornfördelning som är representativ för stora delar av göteborgsområdet.

Lerans innehåll av finfördelad organisk substans har bestämts för ett närliggande område. Leran befanns ha en organisk halt av 0,5 - 1,0 % (viktprocent av jordens torra massa).

En bestämning av de dominerande mineralen inom lerfraktionen har gjorts genom röntgendiffraktionsanalys (Pusch, 1973). Resultaten av två dylika analyser framgår av TABELL 1.

Råmaterialet till försöksmaterialen Eo7, Eo10 och Eo11 hämtades från Värnamo i Småland. Det var en varvig isälvssjölera med silt-skikt. Materialet valdes därför att det i naturligt tillstånd är i det närmaste helt fritt från salter. Varvigheten försvann givetvis vid omrörningen och de tillverkade materialen är siltiga leror. Lermineralet bedöms i huvudsak vara illit.

De tillverkade materialens data före elektroosmotisk avvattning

TAB.1. Resultat av röntgendiffraktionsanalys på två lerprover från Bäckebol (efter Pusch, 1973)

Djup m	Dominerande mineral inom lerfraktionen						
	Illit	Klorit	Kaolinit	M_m^a	Kvarts	Fältspat	Karbonat
4	+++	+	+	(+)	+	+	++
7	+++	+	(+)		+	+	++

^a M_m = svällande mineral; +++ = dominerande; ++ = betydande mängd;
+ = mindre mängd; (+) = spår.

och försöksbetingelserna vid modellförsöken framgår av TABELL 2.

Materialens kornfördelning framgår av kornfördelningskurvorna.
(Bilagor).

Materialens deformationsegenskaper vid belastning framgår av
ödometerdiagram. (Bilagor).

M A T E R I A L D A T A F Ö R E E L E K T R O O S M O S

TABELL 2

	Eo 1	Eo 2	Eo 3	Eo 4	Eo 5	Eo 6 <i>Lärre</i>	Eo 6 <i>Sarnd'</i>	Eo 7	Eo 8	Eo 9	Eo 10	Eo 11
Naturlig vattenkvot	w %	67,7	70,6	67,8	82,9	82,6	83,88	34,7	88,7	84,8	41,8	39,1
Finlekstal	w _F %	61,1	66,9	63,6	76,4	76,7	79,74	33,5				
Plasticitetegräns	w _P %	30,4	27,5	28,8	33,4	33,4		23,2				
Plasticitetstal	I _P %	30,7	39,4	34,8	43,0	43,3		10,3				
Lerhalt < 2 μ	z	64	74	67	82	82		37				
Aktivitet		0,48	0,54	0,52	0,53	0,53		0,28				
Salthalt i porvatten	o/oo	7,4	7,0	5,9	9,7	10,0	8,15	≈0,1	26,2	29,2	3,6	1,9
Densitet	ρ	1,63	1,59	1,60	1,52	1,52	1,51	1,85	1,47	1,47	1,80	1,80
Kompaktdensitet	ρ _s	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7
Odränerad skjuvhållfasthet	τ _{fu} kPa	8,11	8,12	7,8	9,07	9,7	9,43	4,7				
Sensitivitet	St	10,0	7,28	7,0	9,6	9,8	8,2	3,7				
Förkonsolideringsstryck	σ' _c kPa	37	37	28,5	28	37	35	30	20	30	30	30
Permeabilitet	K m/sek	4·10 ⁻¹⁰	6·10 ⁻¹⁰	4,7·10 ⁻¹⁰	5,6·10 ⁻¹⁰	6·10 ⁻¹⁰	8·10 ⁻¹⁰	5,5·10 ⁻¹⁰	2,3·10 ⁻¹⁰			
Resistivitet	ρ Ω m	2,60	3,60	4,06	1,84	1,50	2,13	1,71	63,00	0,90	0,85	7,89
Försöksbetingelser i modellfält												
Överlagringstryck	σ kPa	30	60	60	30	30	30	30				
Porvattentryck (back pressure)	u kPa	0	30	0	0	0	4	0				
Effektivt överlagringstryck	σ' kPa	30	30	60	30	30	26	30				
Strömstyrka	I mA	50	50	50	50	Var.	50-100	10				

7 FÖRSÖK

7.1 Modellfält

Sju modellfältförsök har utförts. Materialdata och försöksbetingelser framgår av TABELL 2.

Teknisk kommentar till försöken

Den enda mätning som bjöd på några svårigheter av porvattentrycks-mätningen. Detta var väntat eftersom mätning av undertryck i vatten alltid är besvärligt. Porvattentrycksmätarna har registrerats så länge de avlästa värdena bedömts vara realistiska. De registrerade värdena ger en god bild av vad som händer med porvattentrycken vid elektroosmos, speciellt i försök Eo4.

De fem mätsektionerna vars placering framgår av FIG. 14 sid.34 har nummererats från 1-5 med 1 närmast anod och 5 närmast katod. I försök Eo4 är mätsektion 1 närmast anoden vid första strömriktningen.

7.2 Resultat av modellfältförsök

I diagram "Sättning och vattenavgång - tid" är avläsningarna av sättningsklockorna och byretterna inlagda. Vattenavgången representeras av den tjocka tvärstreckade linjen.

I diagram "Portryck - tid" har avläsningarna av portrycksmätarna lagts in. Kurvorna slutar då mätvärdena indikerat att något fel uppstått.

Diagram "Spänningsfall - tid" visar avläsningarna av spänningsfallet mellan olika punkter. Kurvan "Anod - 1" visar spänningsfallet i övergången mellan anodraden och leran plus spänningsfallet i leran mellan anodraden och den närmaste mätelektroden. Kurvan "1 - 5" visar spänningsfallet i leran mellan mätelektroden i mätsektionerna 1 och 5. Kurvan "5 - Katod" visar spänningsfallet i övergången mellan katodraden och leran plus spänningsfallet i leran mellan katodraden och den närmaste mätelektroden.

Diagrammet "Sättningsprofil" visar distributionen av sättningsarna mellan anod och katod vid olika tidpunkter.

Diagrammet "Portrycksprofil" visar portrycksfördelningen vid olika tidpunkter. Vid redovisning av försök Eo3 har i övre högra hörnet lagts in kurvor för den beräknade portrycksfördelningen om materialet ej utsatts för elektroosmos utan enbart påverkats av pumpning vid katoden. Då de verkliga mätpunkterna från detta försök är relativt få har portrycksprofilen beräknats med hjälp av dels mätta portryck och dels mätta sättningar. Mätta portryck är inlagda som fyrkanter.

Diagrammet "Potentialprofil" visar hur spänningsfallet varierar mellan anod och katod.

Diagrammet "Odränerad skjuvhållfasthet och förkonsolideringstryck" visar hur dessa egenskaper förändras och hur de varierar mellan anod och katod. Materialets egenskaper före elektroosmos visas som horisontella linjer. Förkonsolideringstrycket visas som en långstreckad linje, den ostörda skjuvhållfastheten som en punktdad linje och den omrörda skjuvhållfastheten som en kortstreckad linje.

Materialets egenskaper efter elektroosmos visas genom punkter och anslutande kurvor. Förkonsolideringstrycket representeras av trianglar, ostörd skjuvhållfasthet av cirklar och den omrörda skjuvhållfastheten av fyrkanter.

Som en jämförelse till mätt förkonsolideringstryck har det ur sättningen och ödometerkurvan framräknade förkonsolideringstrycket lagts in som en tjockare tvärstreckad linje.

Diagrammet "Vattenkvoter" visar förändringar och fördelning av vattenkvot, konflytgräns och plasticitetsgräns efter elektroosmos jämfört med originalmaterialet. Materialets vattenkvoter före elektroosmos visas som horisontella linjer betecknade w_N-0 , w_F-0 respektive w_P-0 .

Försök Eo1 Försöket utfördes med överlagringstrycket lika med förkonsolideringstrycket och utan back-pressure. Detta skulle simulera en ytligt belägen normalkonsoliderad lera med grundvattenytan i markytan. Strömstyrkan hölls konstant 50 mA och behandlingen pågick i 15 dagar. Vid behandlingens slut hade materialet

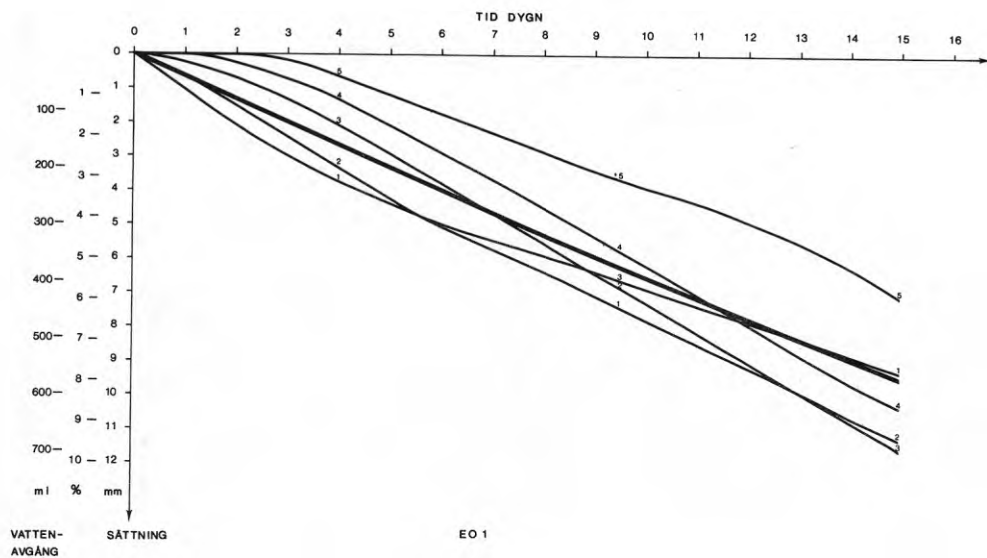
börjat spricka. Dels uppträdde dragsprickor mellan anoderna dels uppträdde skjvsprickor tvärs provet i närheten av katodraden.

I försök Eol användes porvattentryckmätare med slangförbindelse till ett filter placerat mitt i mätsektionen. Dessa fungerade inte tillfredsställande varför inga registreringar redovisas. Portrycksmätarsystemet ändrades sedan så att filtren placerades i mätsektionens botten som visas på ritning, FIG.16.

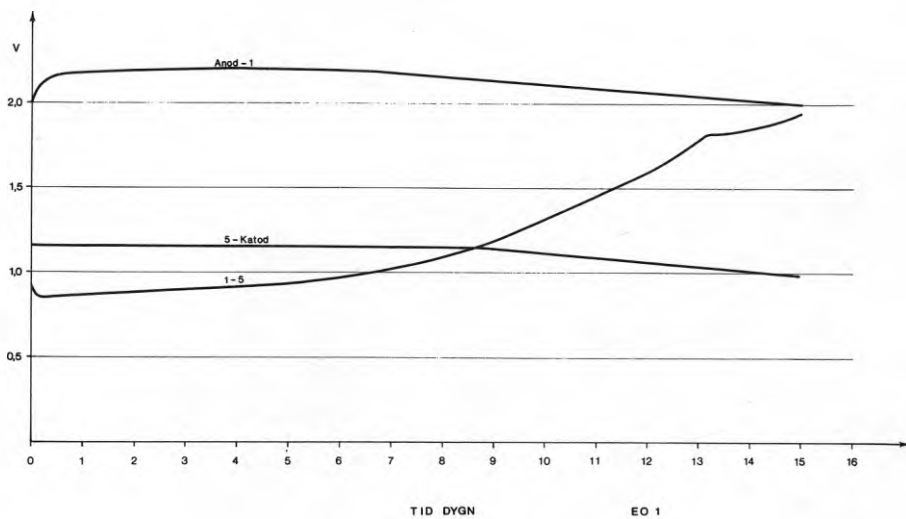
Test Eol The test was run with the overburden pressure equal to the preconsolidation pressure and without back-pressure. It should simulate a normally consolidated clay close to the ground surface and with the groundwater level equal to the ground surface. The current was kept constant at 50 mA and the electroosmosis went on for 15 days. At the end of the electroosmosis the clay had started to crack. Tension cracks appeared between the anodes and shear cracks appeared across the sample near the row of cathodes.

In test Eol the system for porepressure measurement did not work. The porepressure system was later modified and the gauges were placed as shown in FIG.16.

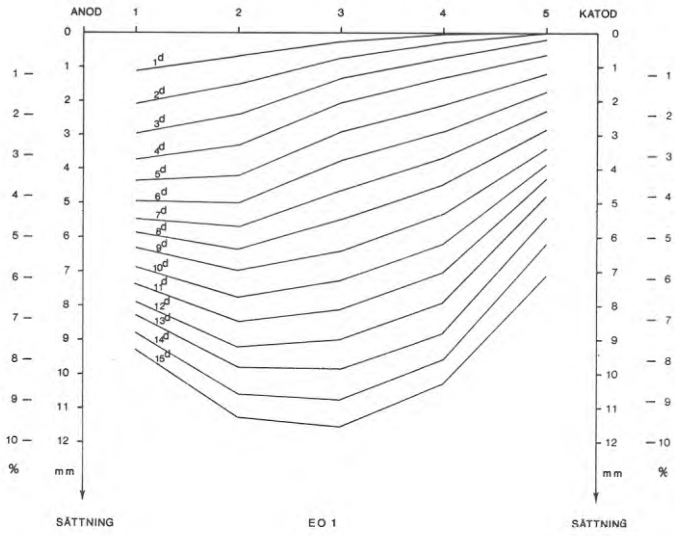
SÄTTNING OCH VATTENAVGÅNG



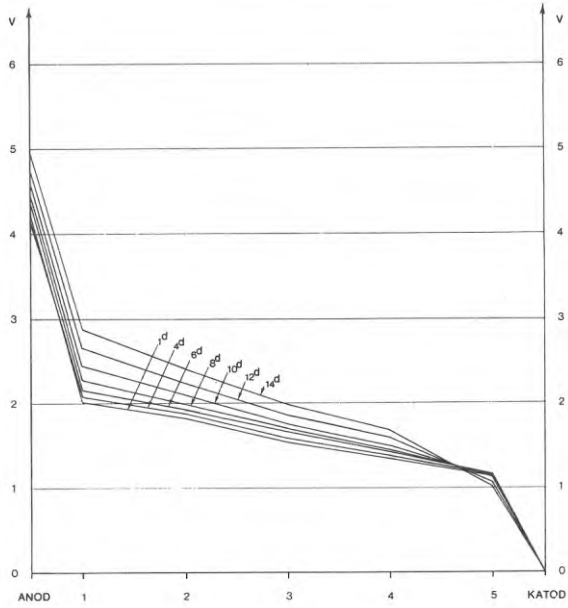
SPÄNNINGSFALL

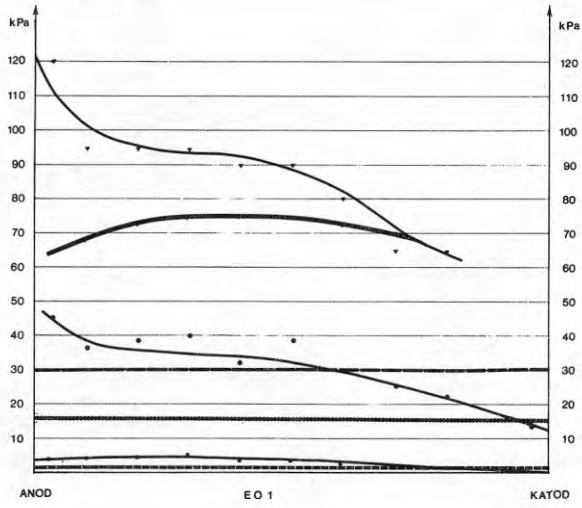


SÄTTNINGSPROFIL



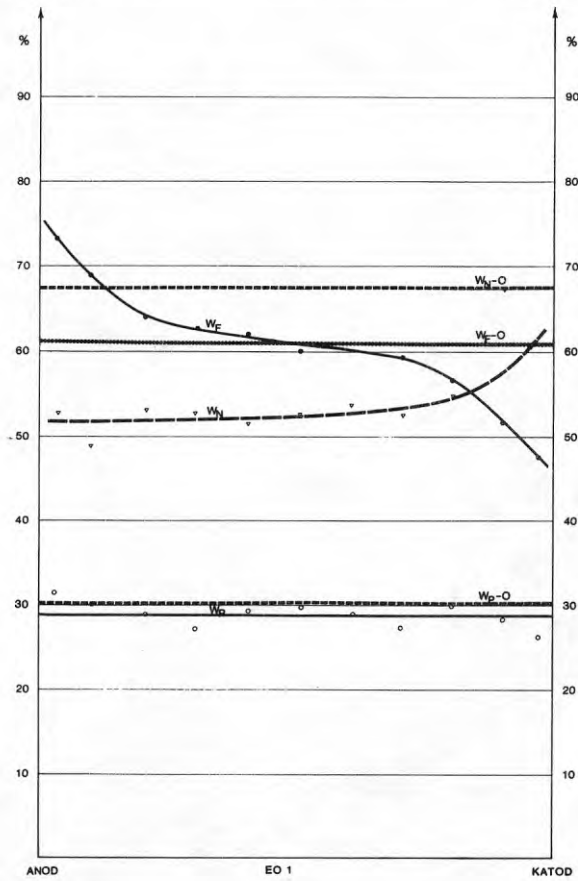
POTENTIALPROFIL EO 1





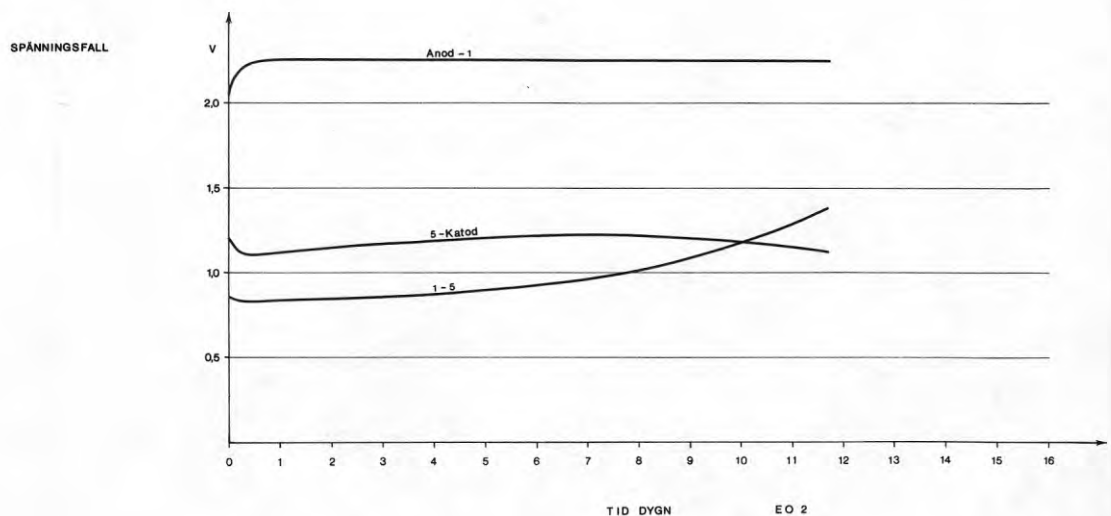
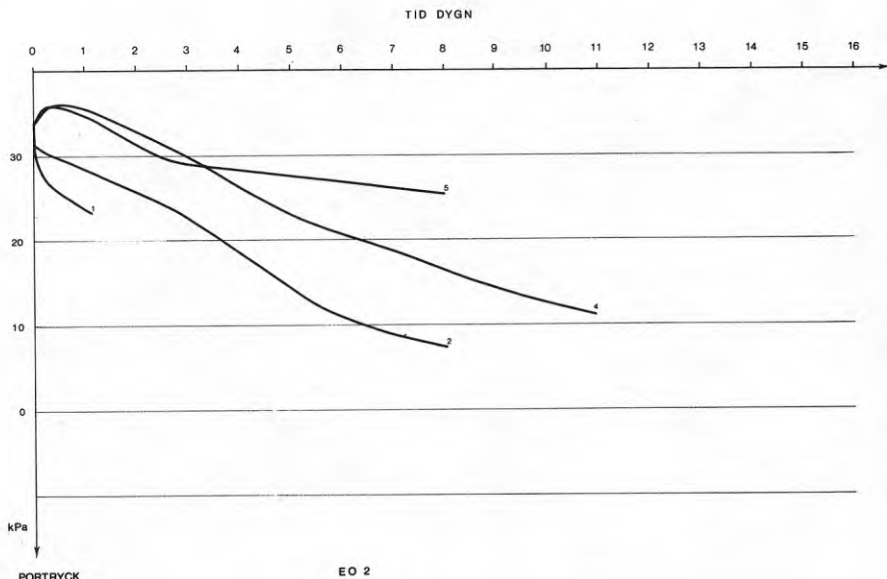
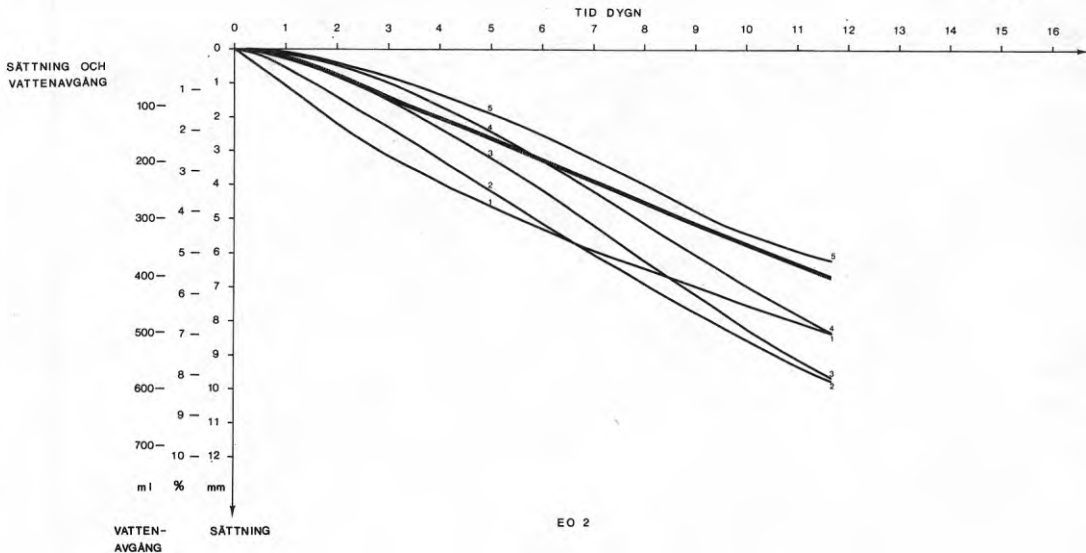
VATTENKVOTER

VATTENKVOTER

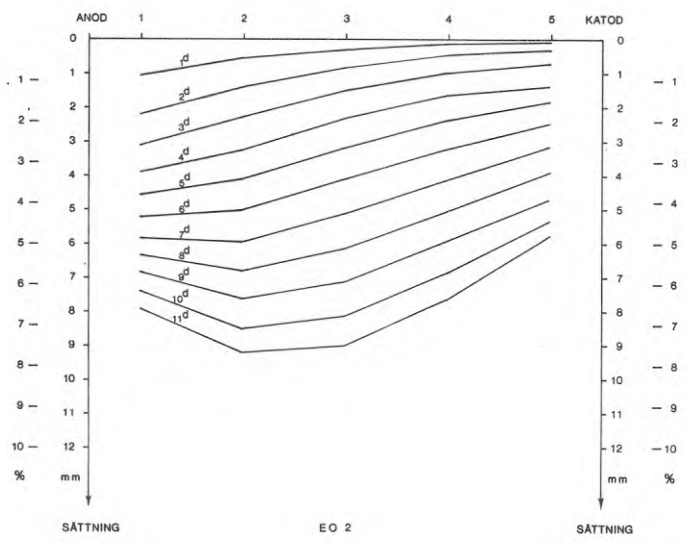


Försök Eo2 Försöket utfördes med överlagringstrycket lika med summan av förkonsolideringstryck och back-pressure. Detta skulle motsvara en normalkonsoliderad lera på större djup med grundvattentan i markytan. Strömstyrkan 50 mA hölls konstant och behandlingstiden var 12 dygn. Samma spricksystem uppstod som vid försök Eo1.

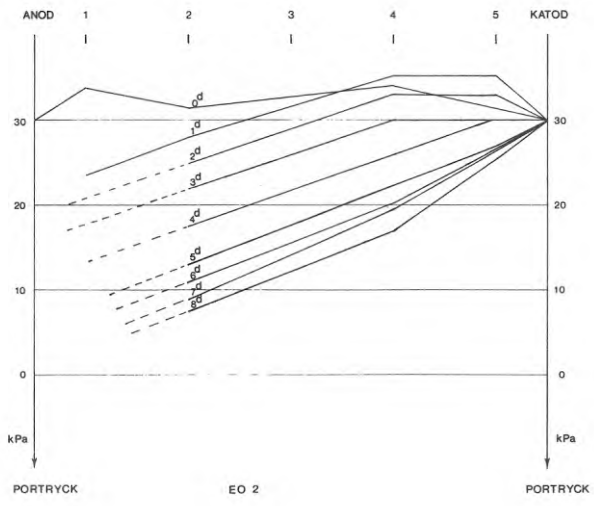
Test Eo2 The test was run with the overburden pressure equal to the sum of the preconsolidation pressure and the porepressure. It should simulate a normally consolidated clay at greater depth with the groundwater level equal to the ground surface. The current 50 mA was kept constant and the electroosmosis went on for 12 days. The same crack pattern as in test Eo1 appeared.



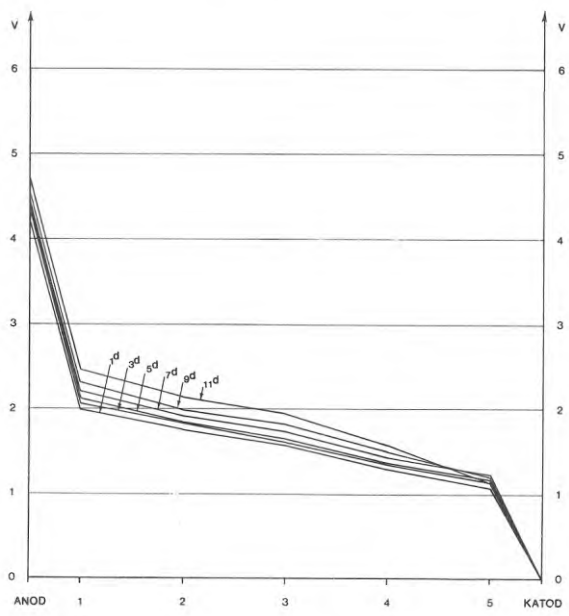
SÄTTNINGSPROFIL

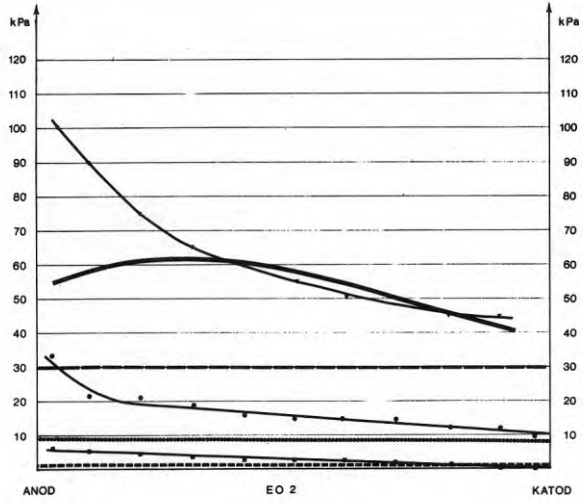


PORTRYCKSPROFIL



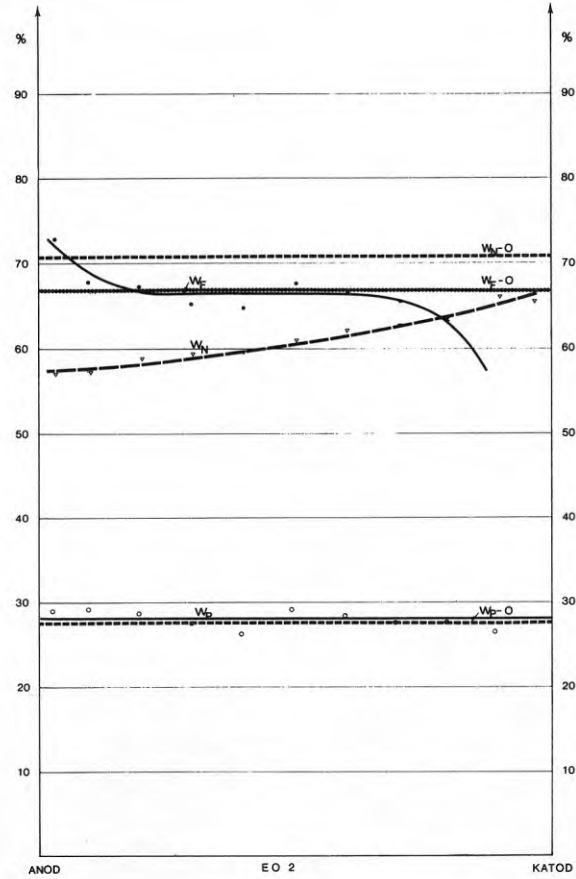
POTENTIALPROFIL EO 2





VATTENKVOTER

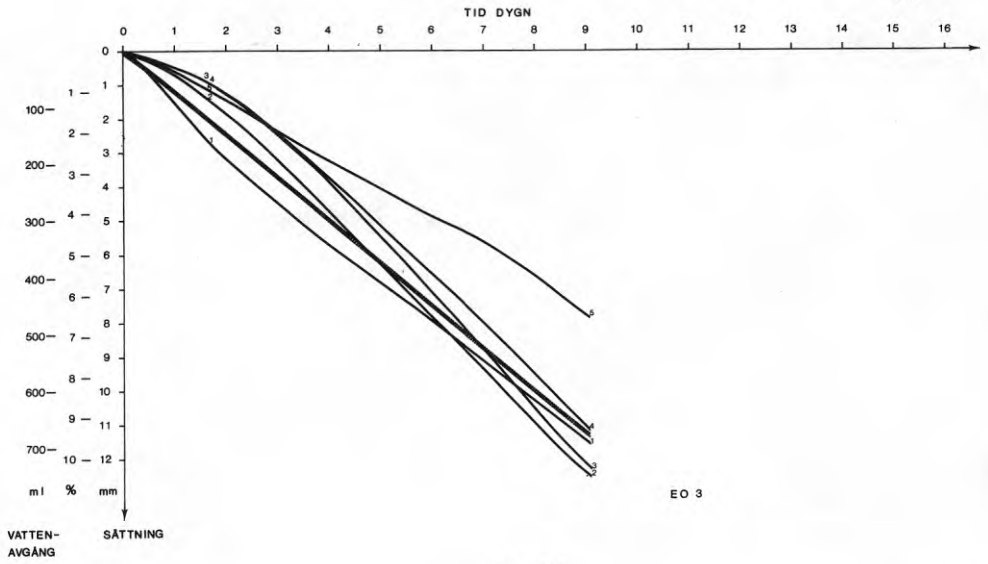
VATTENKVOTER



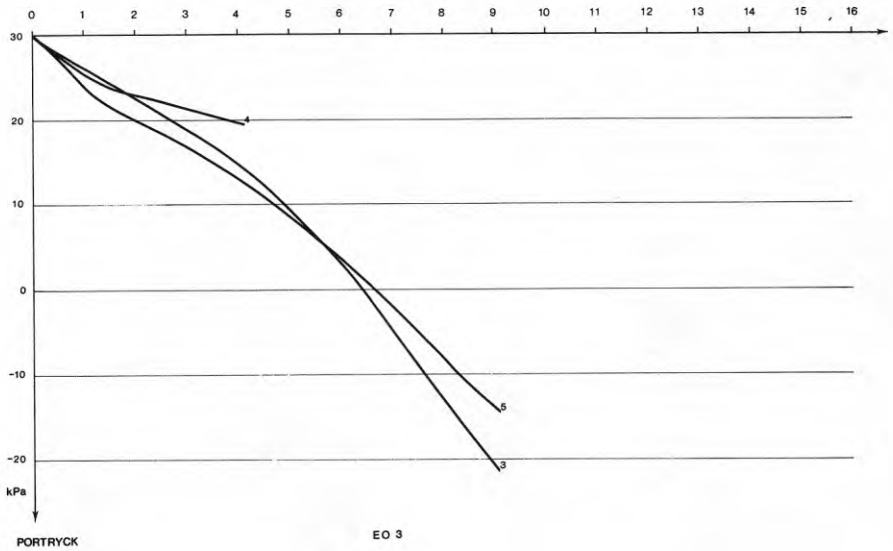
Försök Eo3 Försöket utfördes med ett överlagringstryck som var större än förkonsolideringstrycket. Under rekonsolideringen i modellfältet hölls ett stabiliserande back-pressure. Detta togs bort i samma stund som strömmen slogs på. Detta försök avsåg att simulera en normalkonsoliderad lera på stort djup där elektro-osmosen kombineras med pumpning vid katoden. Effekten av enbart porvattentrycksänkningen vid katoden har datorberäknats och lagts in som streckade kurvor i figurredovisningen. Strömstyrkan 50 mA hölls konstant och behandlingen varade i 9 dygn.

Test Eo3 The test was run with an overburden pressure higher than the preconsolidation pressure. During the reconsolidation in the model field a stabilizing back-pressure was applied. The back-pressure was dropped in the same moment as the current was applied. The purpose of this test was to simulate a normally consolidated clay at great depth where electroosmosis is combined with pumping in the cathodes. The effect of pumping only has been computed and is shown as dotted lines in the porepressure profile. The current was kept constant at 50 mA and the electroosmosis went on for 9 days.

SÄTTNING OCH
VATTENAVGÅNG

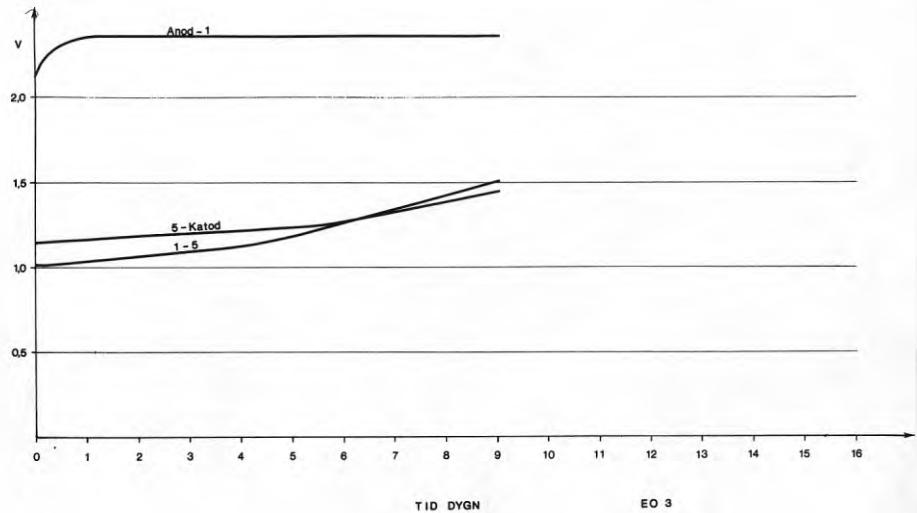


TID DYGN



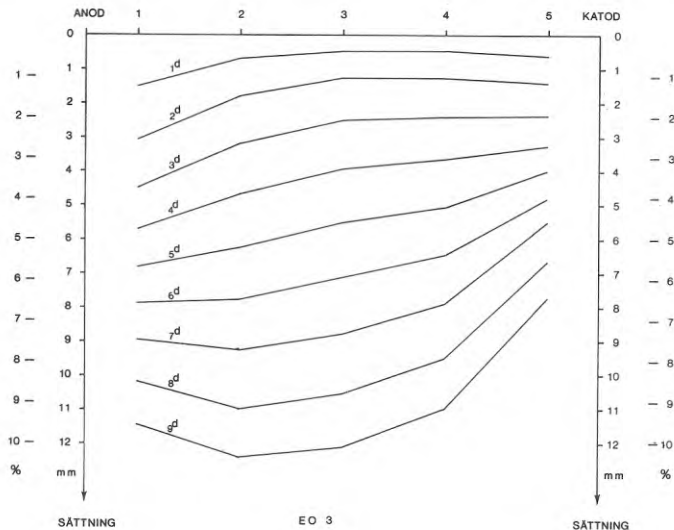
EO 3

SPÄNNINGSFALL

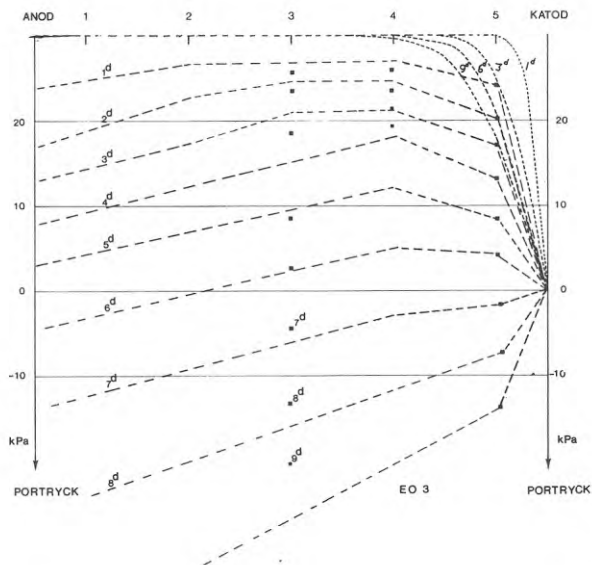


EO 3

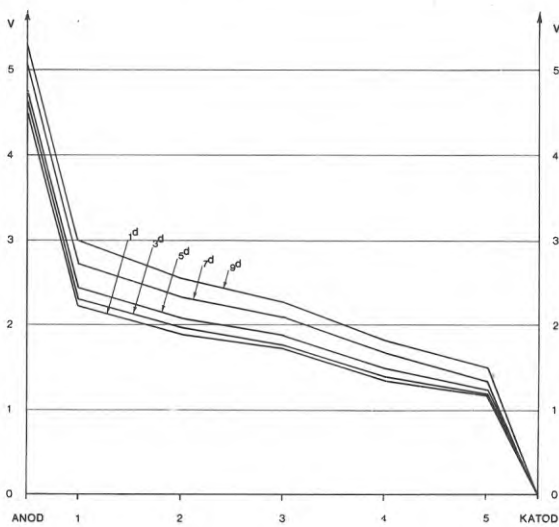
SÄTTNINGSPROFIL



PORTRYCKSPROFIL

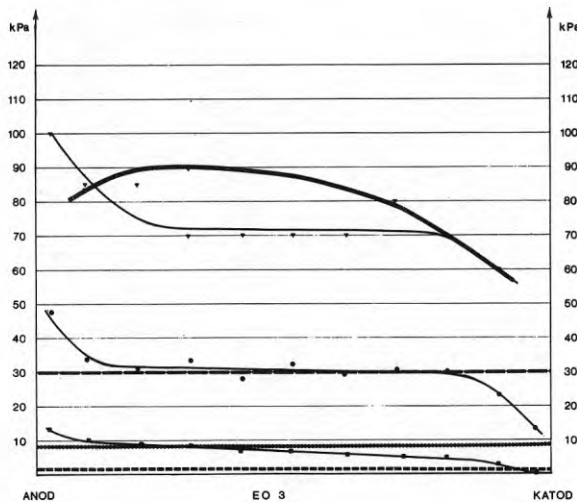


POTENTIALPROFIL EO 3



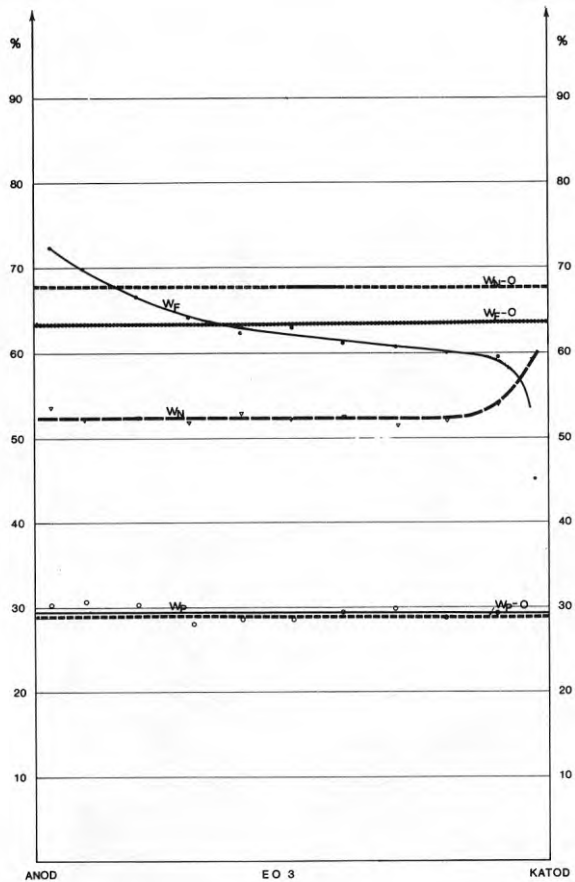
ODRÄNERAD
SKJUVHÄLLFASTHET

FÖRKONSOLIDERINGSTRYCK



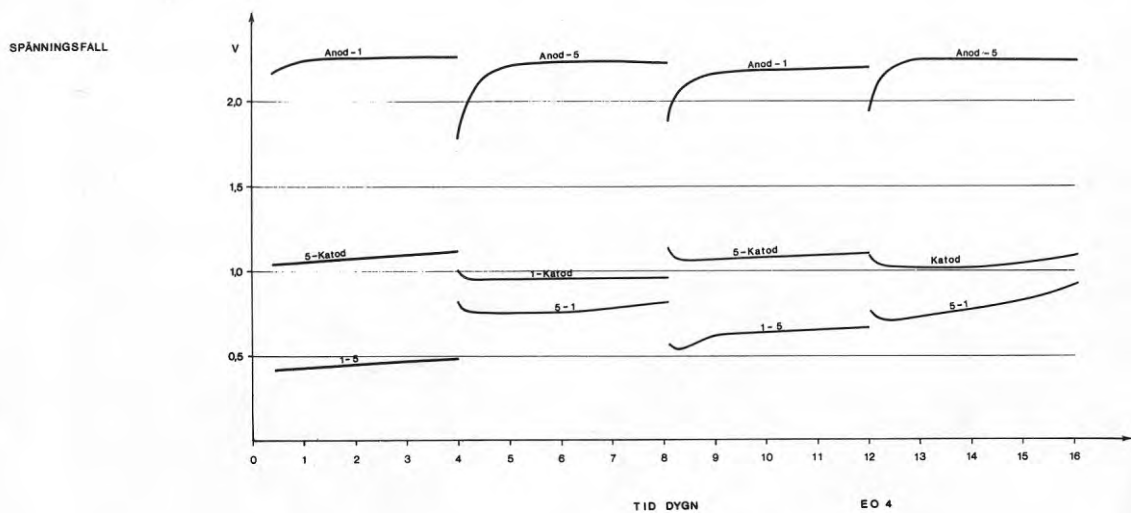
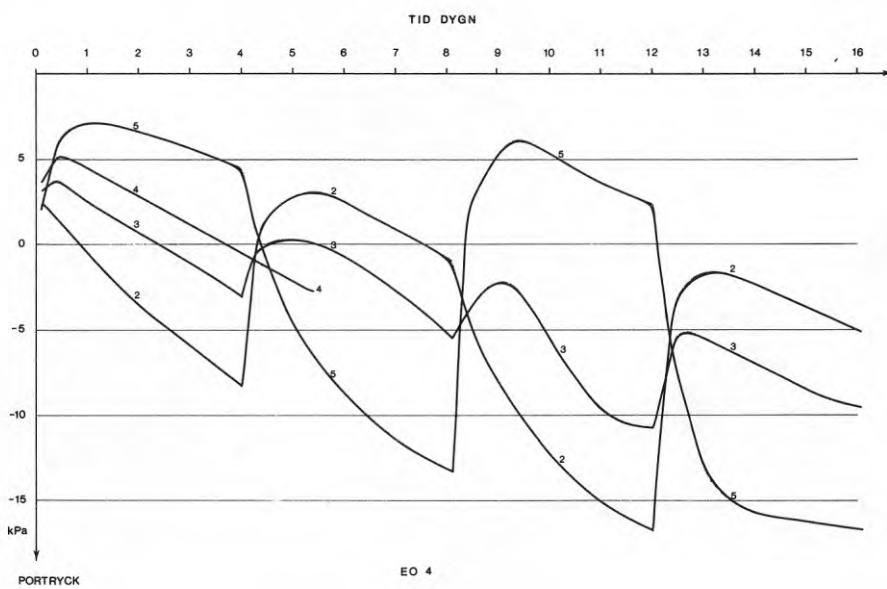
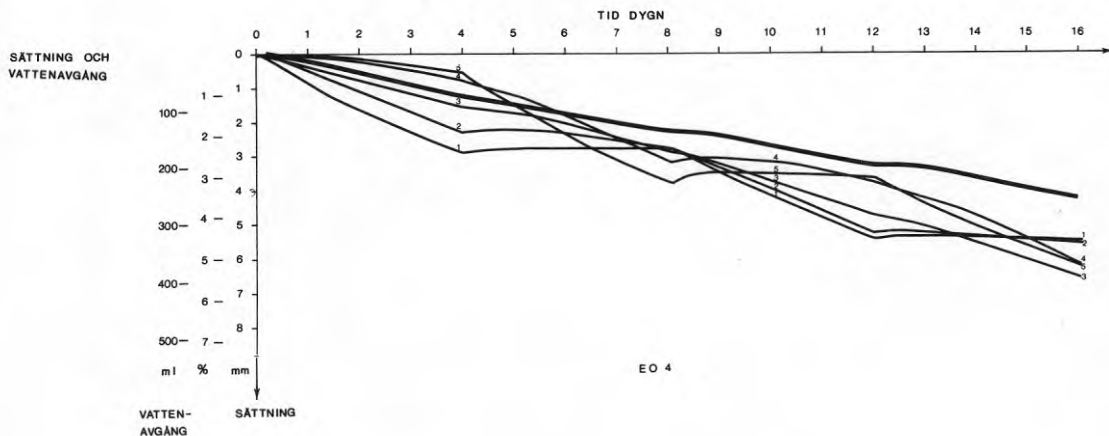
WATTENKVOTER

WATTENKVOTER

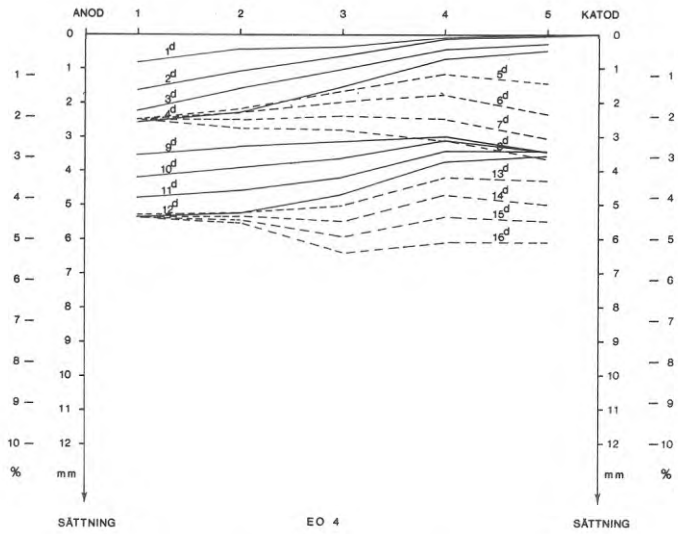


Försök Eo4 Avsikten med försöket var att försöka eliminera ojämnheterna i lerans egenskaper efter elektroosmos. Försöket utfördes utan back-pressure och med överlagringstrycket lika med förkonsolideringstrycket. Strömstyrkan 50 mA hölls konstant. Den fick verka 4 dygn i en riktning, vändes och fick verka 4 dygn i motsatt riktning, vändes på nytt och vändes efter 4 dygn en sista gång. Den totala behandlingstiden var 16 dygn.

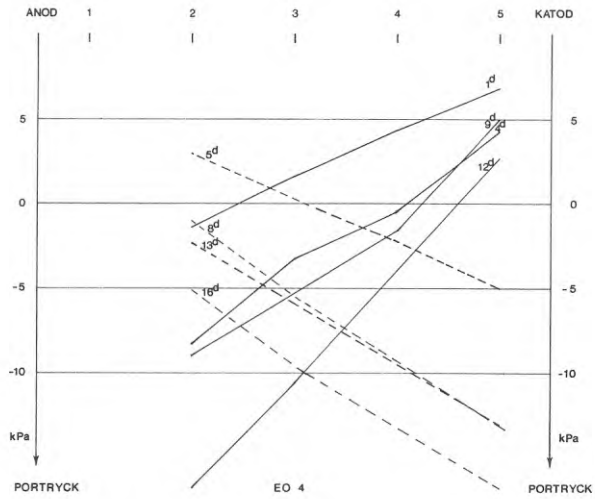
Test Eo4 The purpose of the test was to try to eliminate the variations in properties of the clay after electroosmosis. The test was run without back-pressure and with an overburden pressure equal to the preconsolidation pressure. The current 50 mA was kept constant. It was run 4 days in one direction, was reversed and was run 4 days in the opposite direction, was reversed again and was after 4 days reversed for the last time. The total time for electroosmosis was 16 days.



SÄTTNINGSPROFIL

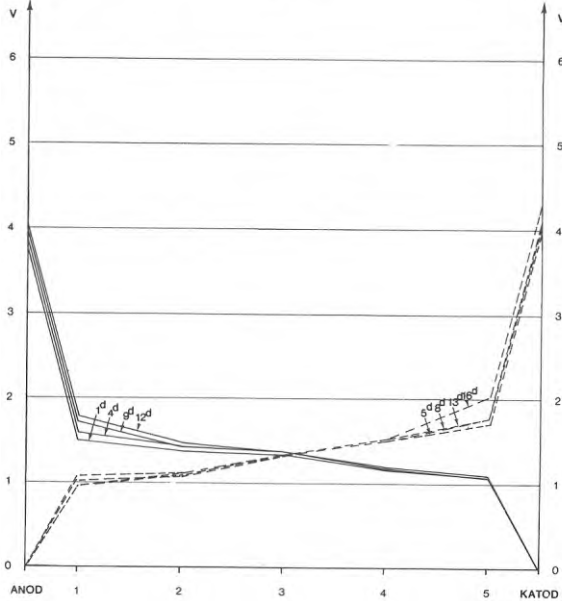


PORTRYCKSPROFIL



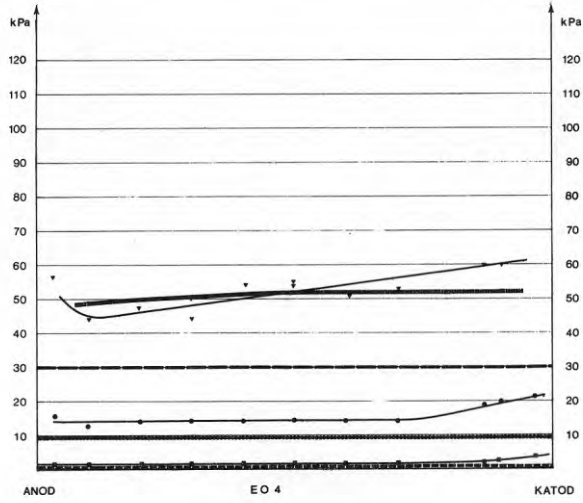
POTENTIALPROFIL

EO 4



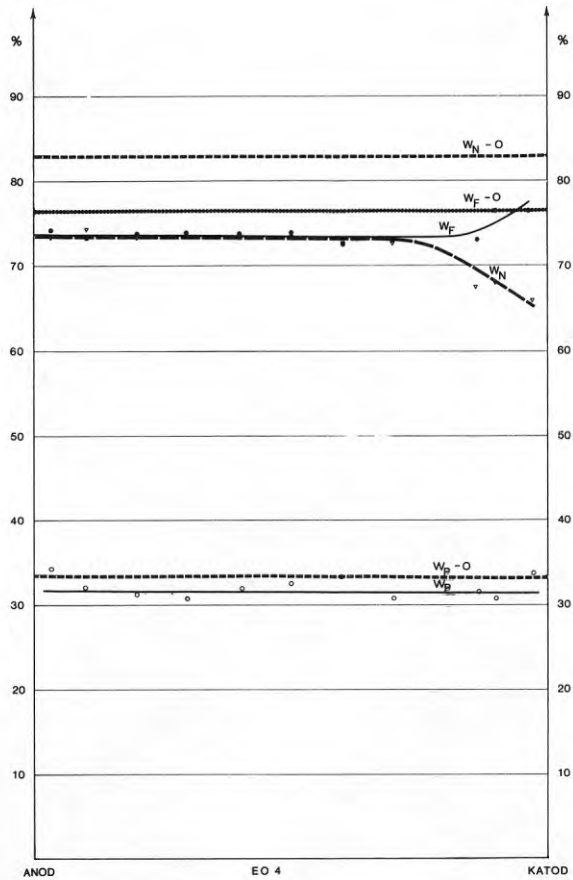
ODRÄNERAD
SKJUVHÅLLFASTHET

FÖRKONSOLIDERINGSTRYPCK



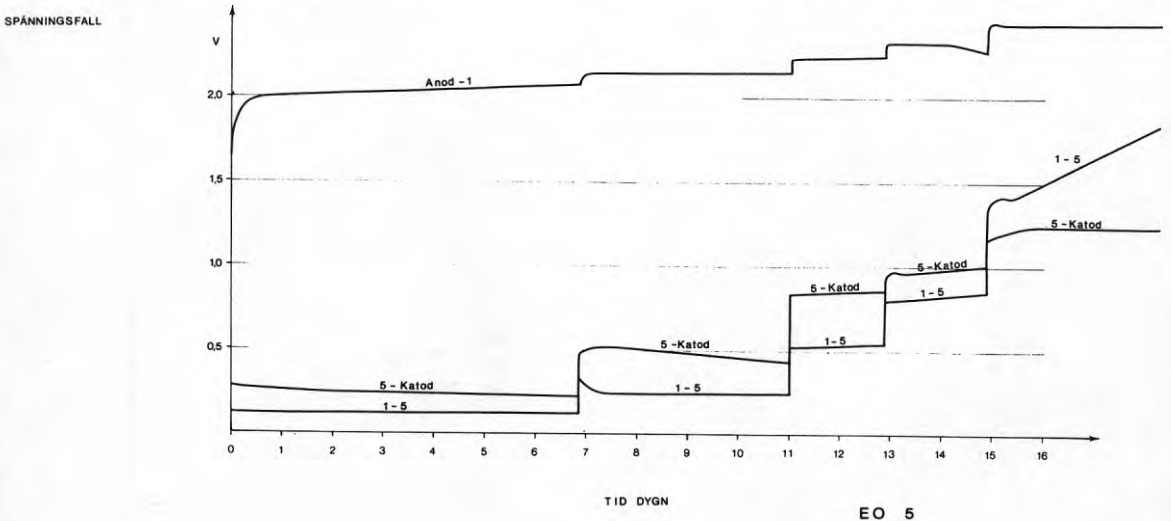
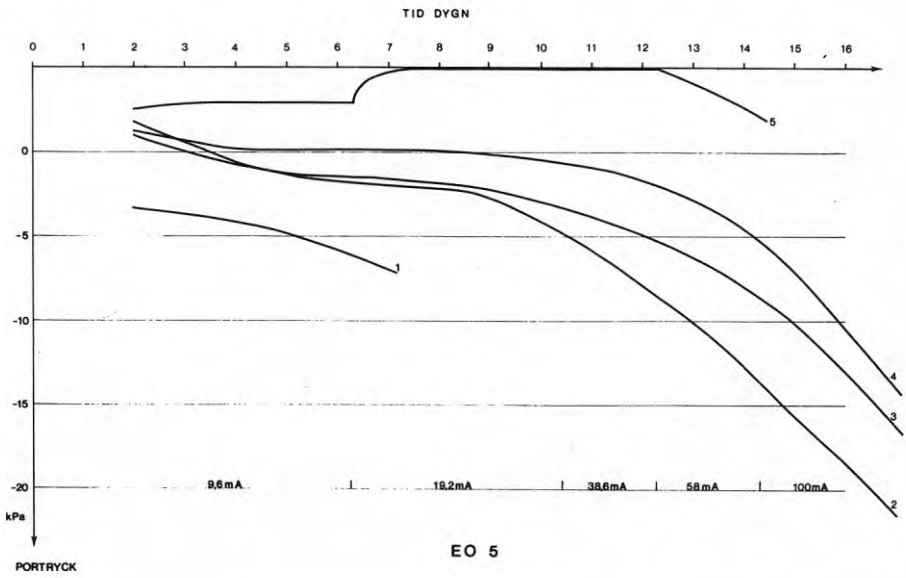
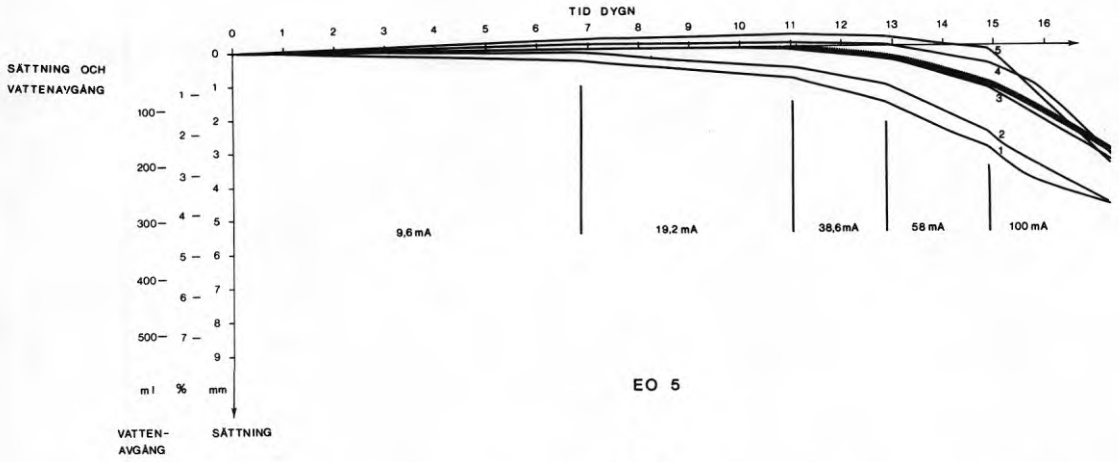
WATTENKVOTER

WATTENKVOTER

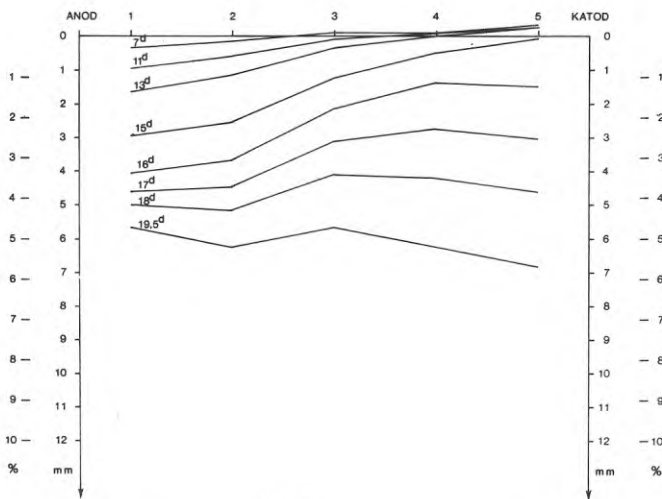


Försök Eo5 Avsikten med försöket var att undersöka sättningshastighetens variation med strömstyrkan. Försöket utfördes utan backpressure och med överlagringstrycket lika med förkonsolideringstrycket. En strömstyrka på 9,6 mA kopplades in och fick verka i 7 dygn. Strömstyrkan ökades därefter till 19,2 mA och fick verka i 4 dygn. Den ökades så till 38,6 mA och verkade 2 dygn och strömstyrkan 58 mA fick verka ytterligare 2 dygn. Den sista strömstyrkan 100 mA verkade under 5 dygn. Sammanlagt varade försöket i 20 dygn.

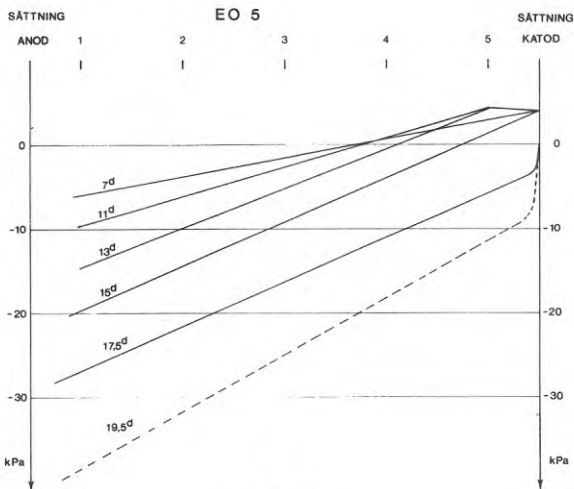
Test Eo5 The purpose of the test was to investigate the variation of rate of settlement with current. The test was run without backpressure and with an overburden pressure equal to the preconsolidation pressure. A current of 9,6 mA was applied and was run for 7 days. The current was then increased to 19,2 mA and was run for 4 days. It was then increased to 38,6 mA and was run for 2 days and then a current of 58 mA was run for another 2 days. The last current 100 mA was run for 5 days. Altogether the testing time was 20 days.



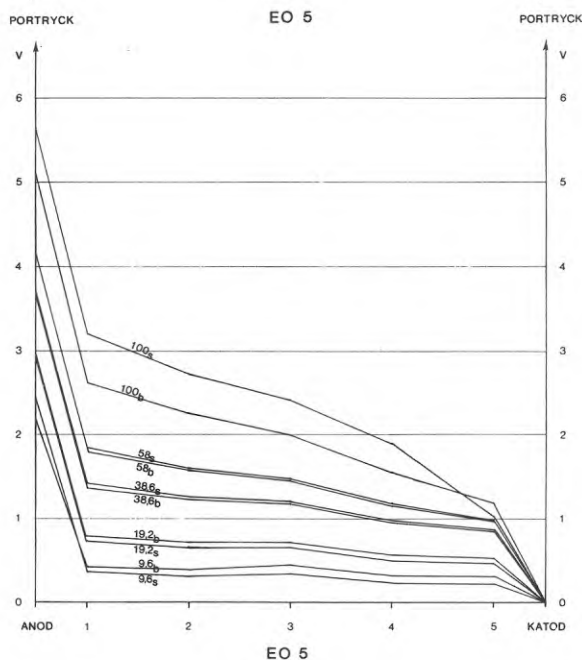
SÄTTNINGSPROFIL



PORTRYCKSPROFIL

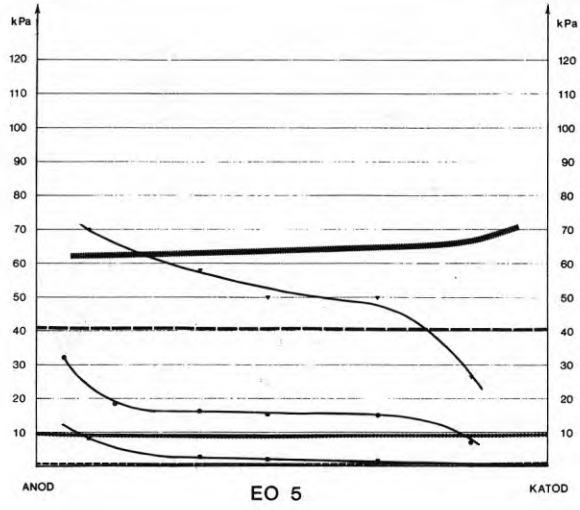


POTENTIALPROFIL



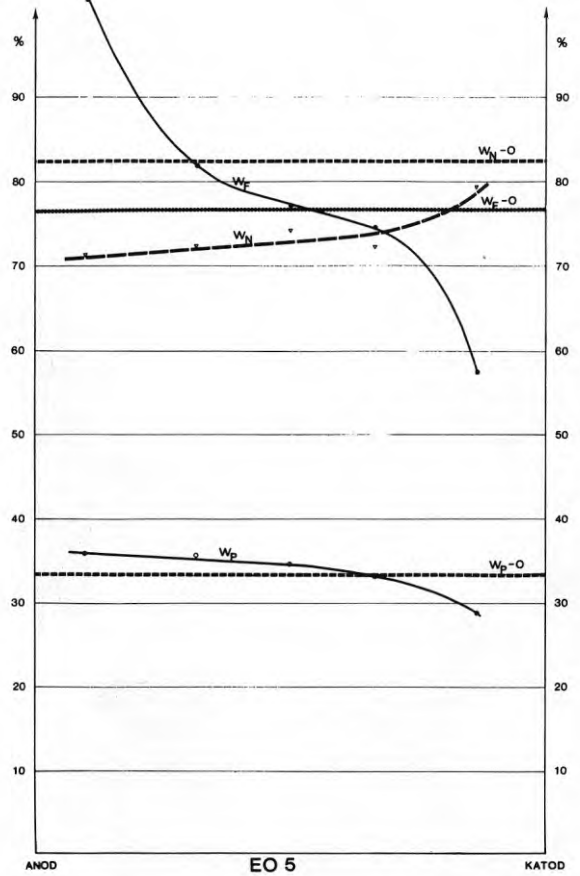
ODRÄNERAD
SKJUVHÄLLFASTHET

FÖRKONSOLIDERINGSTRYCK



VATTENKVOTER

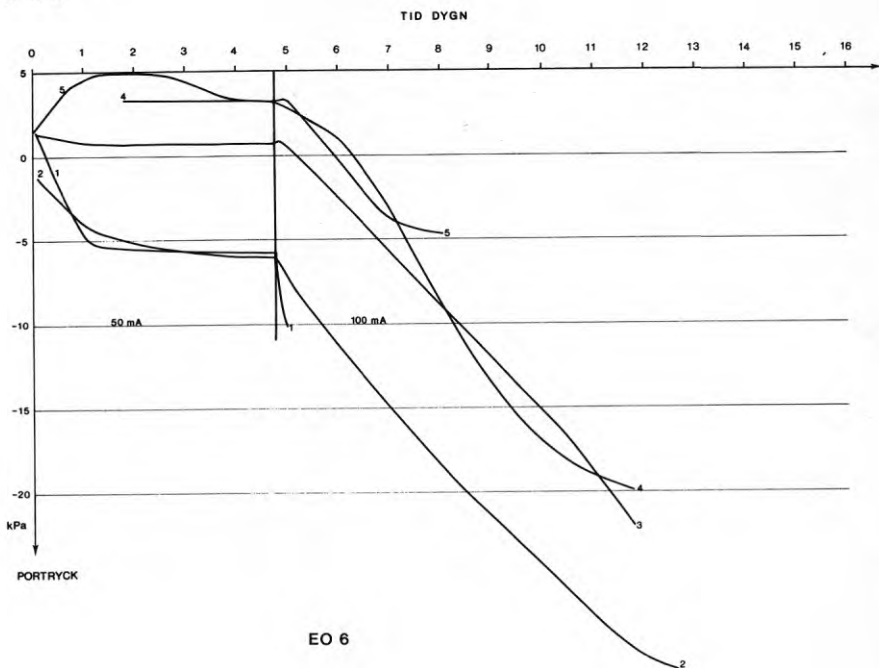
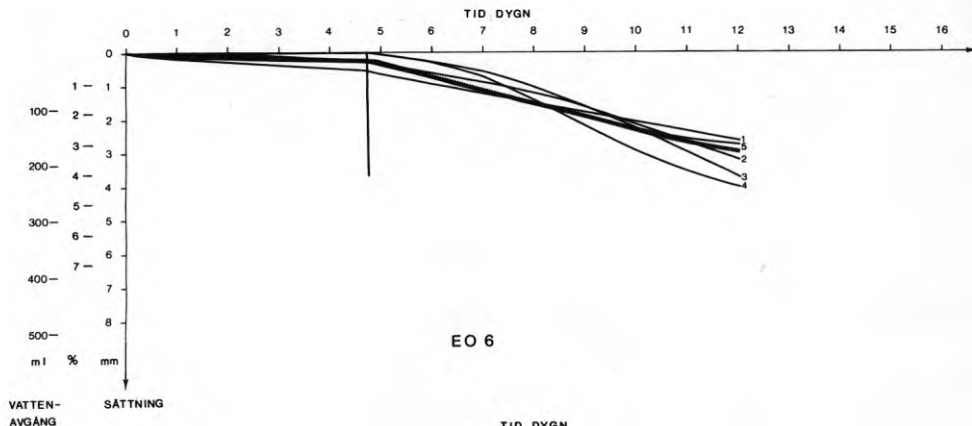
VATTENKVOTER



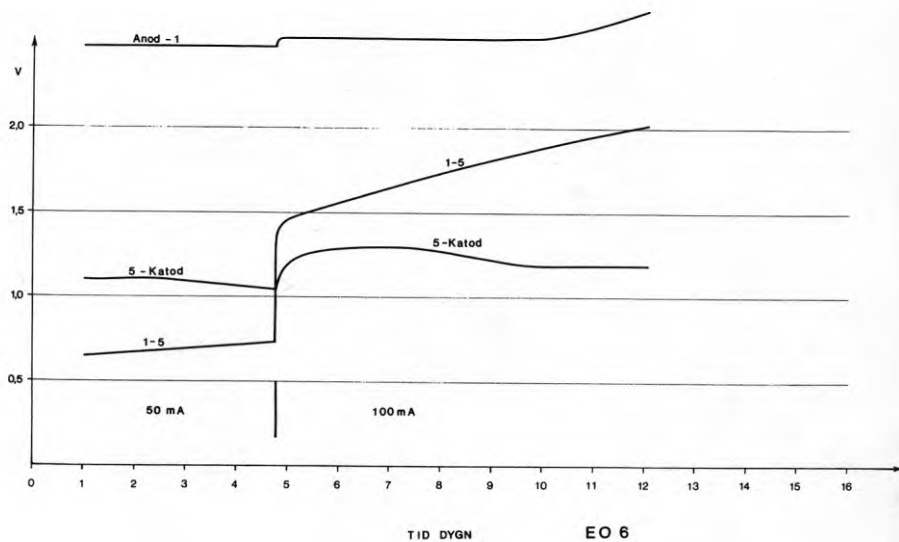
Försök Eo6 Avsikten med försöket var att undersöka inverkan av ett högpermeabelt skikt i leran. Försöket utfördes med överlagringstrycket lika med förkonsolideringstrycket. Strömstyrkan 50 mA hölls konstant i 5 dygn och ökades därefter till 100 mA som fick verka i 7 dygn. Försöket varade i 12 dygn.

Test Eo6 The purpose of the test was to investigate the influence of a permeable layer of sand in the clay. The test was run with an overburden pressure equal to the preconsolidation pressure. The current 50 mA was kept constant for 5 days and was then increased to 100 mA and kept constant for another 7 days. The testing time was 12 days.

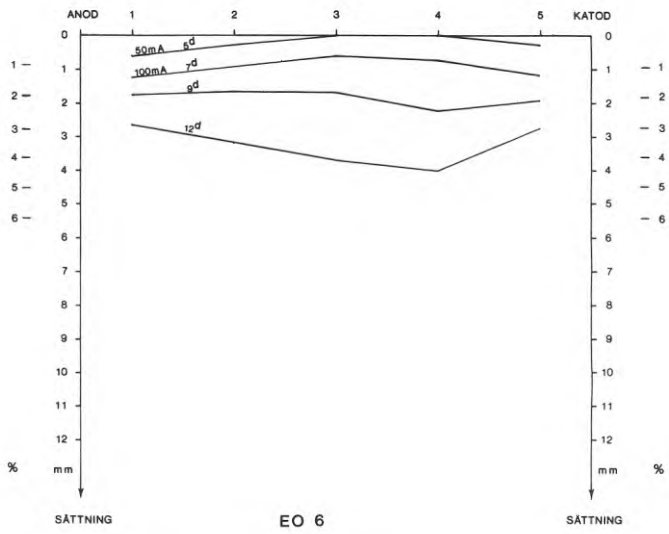
SÄTTNING OCH
VATTENAVGÅNG



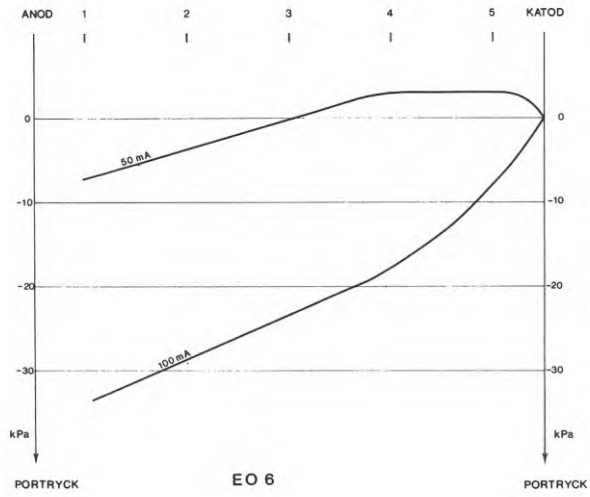
SPÄNNINGSFALL



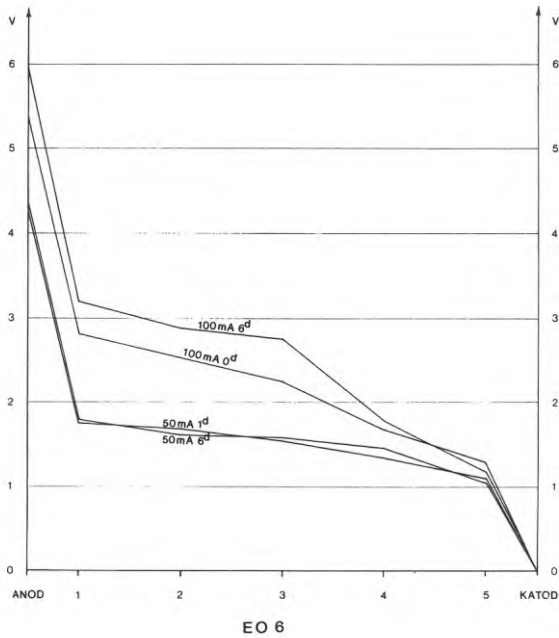
SÄTTNINGSPROFIL

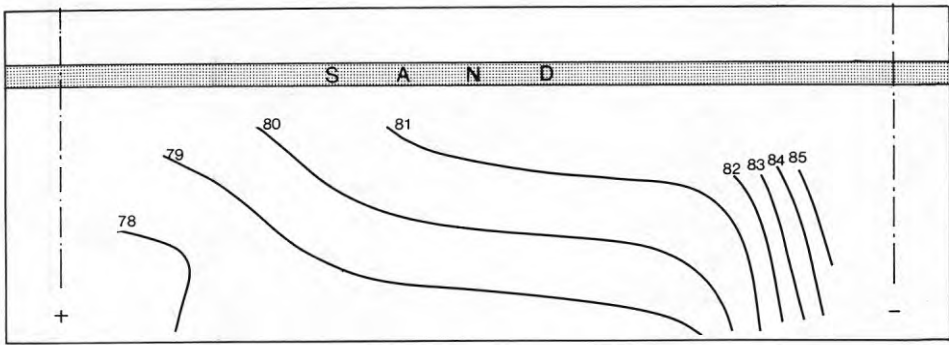


PORTRYCKSPROFIL

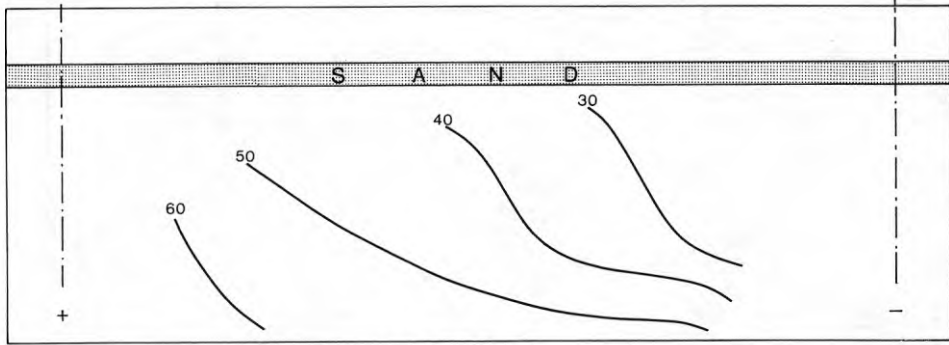


POTENTIALPROFIL

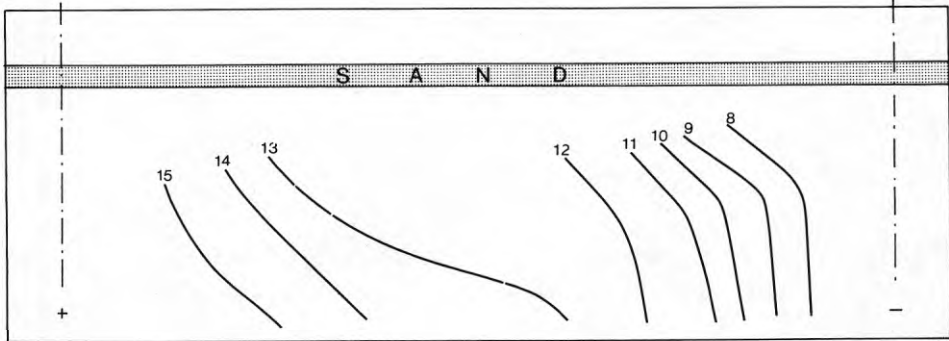




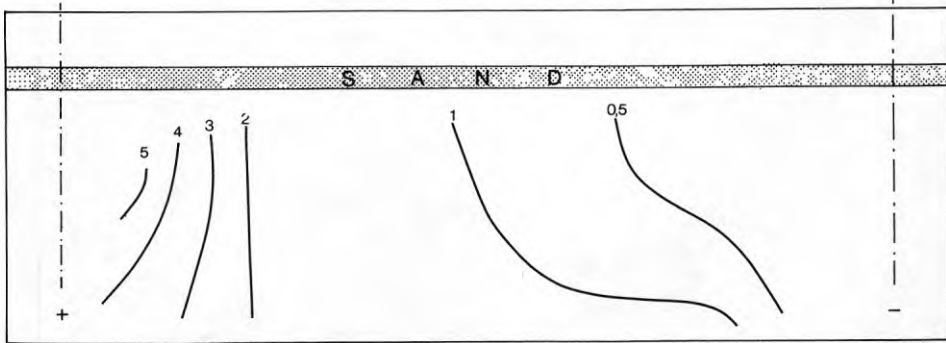
w %



σ'_c kPa



τ_{FU} kPa



τ_R kPa

EO 6

Försök Eo7 Avsikten med försöket var att undersöka om leras egenskaper förändras av elektroosmos även om materialet är fritt från salt. Försöket utfördes med överlagringstrycket lika med förkonsolideringstrycket. Försöket utfördes med strömstyrkan 10 mA och varade i 11 dygn.

Portrycksmätarna slutade fungera vid ett så tidigt stadium att resultaten ej redovisats.

Sättningsförloppet påverkades av att provet förutom att komprimeras vertikalt också minskade i längd och bredd.

Den i byretterna uppmätta volymändringen översteg avsevärt den som motsvaras av den vertikala kompressionen.

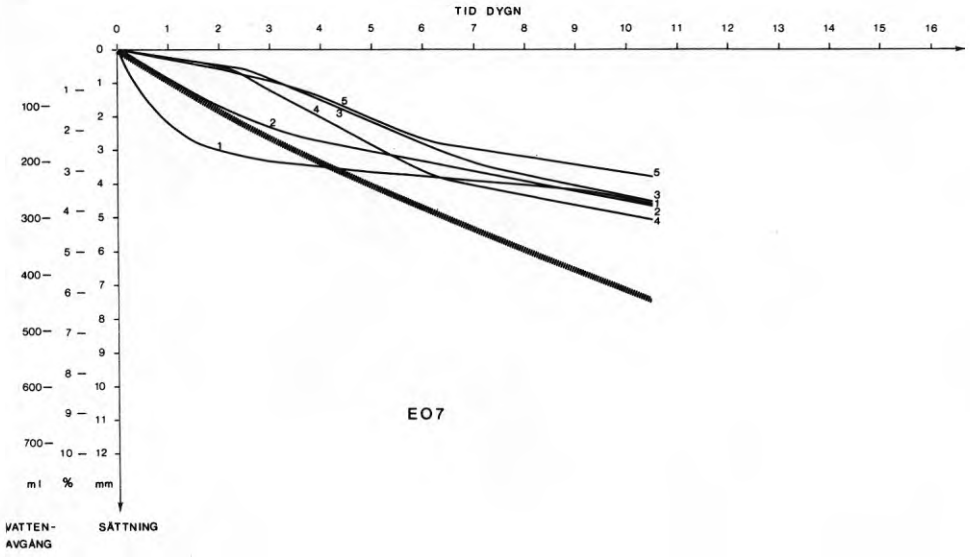
Test Eo7 The purpose of the test was to investigate if the properties of a clay are changed due to electroosmosis even if the clay is free from salts. The tests was run with an overburden pressure equal to the preconsolidation pressure. The test was run for 11 days with a current of 10 mA.

The porepressure gauges stopped reading at an early stage of the test why the readings are not shown.

The progress of settlement was affected by the fact that the sample apart from vertical compression also decreased in length and width.

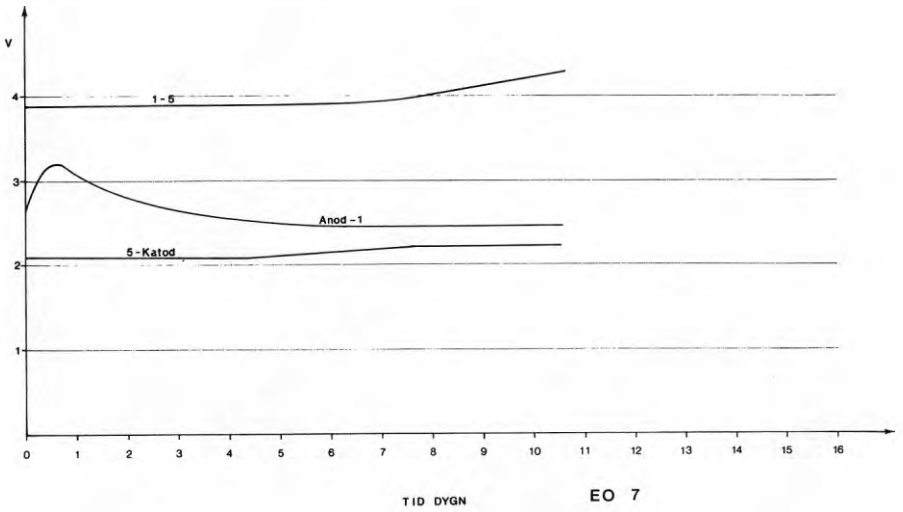
The measured volume change in the burettes was much greater than the volume change corresponding to the measured vertical compression.

SÄTTNING OCH VATTENAVGÅNG



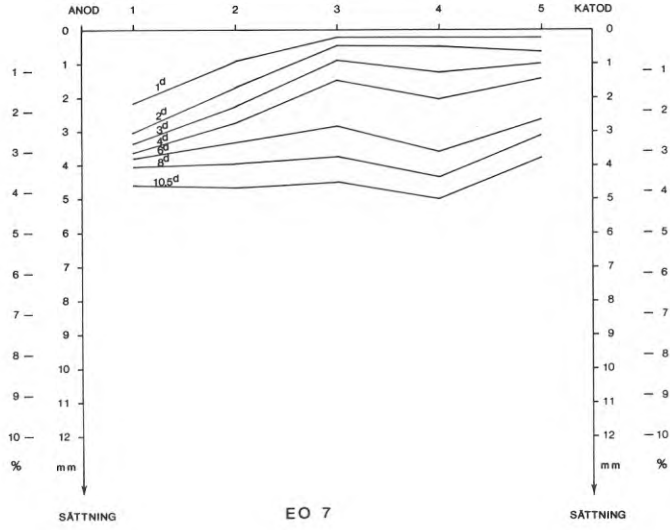
EO7

SPÄNNINGSFALL

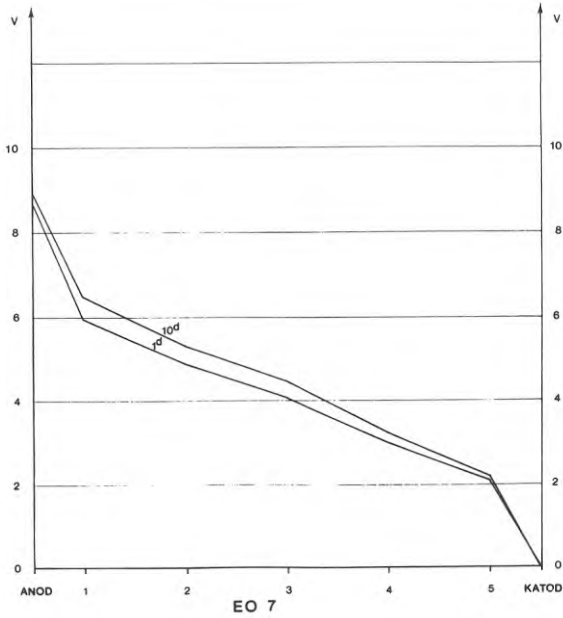


EO 7

SÄTTNINGSPROFIL

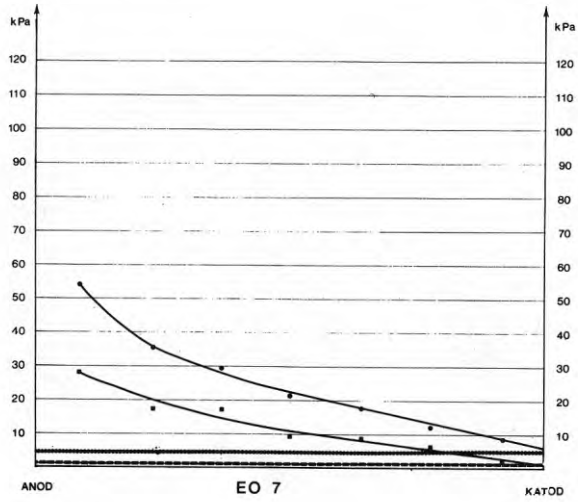


POTENTIALPROFIL



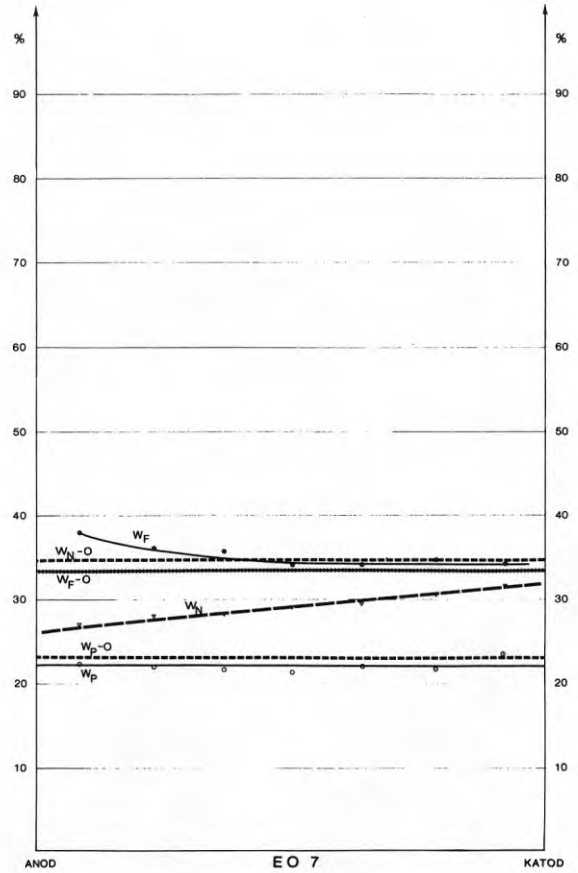
ODRÄNERAD
SKJUVHÅLLFASTHET

FÖRKONSOLIDERINGSTRYCK



VATTENHALTER

VATTENHALTER



7.3 Försök i elektroödometer

Parallellt med modellfältförsöken har försök utförts i elektroödometer. Dessa försök har syftat till att undersöka inverkan av överkonsolideringsgrad hos leran och strömstyrkan. På materialen Eo1-2 och Eo5-11 har försök med olika strömstyrkor utförts på normalkonsoliderade prover. Försöksserier med varierande förkonsolideringstryck, överlagringstryck och strömstyrkor har utförts på materialen Eo3 och Eo4. I dessa försök har materialen belastats med önskat förkonsolideringstryck som fått ligga på 1 dygn. Därefter har materialet lastats av till önskat överlagringstryck och fått relaxera 1 dygn innan strömmen kopplats på.

Totalt har inom detta projekt 80 försök utförts med elektroödometer.

7.4 Resultat av elektroödometerförsök

Som tidigare nämnts vid beskrivning av apparatur och försöksmetoder har konsolideringskurvan vid försök i elektroödometer en form enligt FIG. 18.

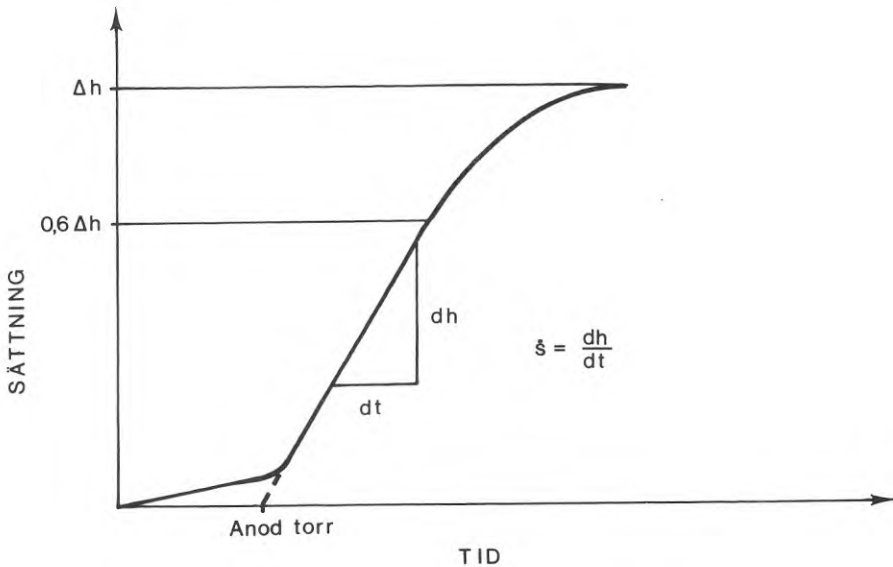


FIG.18. Sättning som funktion av tid vid elektroödometer med konstant strömstyrka.
Settlement as a function of time in electrooedometer tests with constant current.

I försöken har strömstyrkan hållits konstant och slutsättning Δh och sättningshastigheten v , definierade i FIG.18, uppmätts. Resultaten redovisas i tabellform, (TABELL 3).

TABELL 3 E L E K T R O Ö D D O M E T E R F Ö R S Ö K

Material	Salthalt ‰	w %	ρ Ω m	k_e m^2/sV	I mA	\dot{s} mm/h	Δh mm	h_o mm	σ' kPa	σ'_c kPa	
Eo 1	7,4	67,7	2,6	$6 \cdot 10^{-9}$	5,65	0,0058	0,22	17,5	30	37	
					5,65	0,0052	0,27	17,5	30	37	
					11,3	0,030	0,44	17,5	30	37	
					22,6	0,155	0,80	17,5	30	37	
					45,2	0,575	1,72	17,5	30	37	
Eo 2	7,0	70,6	3,6	$6,5 \cdot 10^{-9}$	5,65	0,0128	0,30	19,0	30	37	
					11,3	0,056	0,69	19,0	30	37	
					22,6	0,17	1,26	19,0	30	37	
					45,2	0,531	1,88	19,0	30	37	
					80	1,25	--	19,0	30	37	
62	--	2,20	19,0	30	37						
Eo 3	5,9	67,8	4,06	$6,0 \cdot 10^{-9}$	22,6	0,349	1,265	18,0	51,4	51,4	
					5	22,6	0,210	0,885	16,5	100,0	100,0
					6	22,6	0,153	0,590	18,0	17,1	51,4
					5	22,6	0,090	0,326	16,5	50	100
					5	22,6	0,054	0	16,5	20	100
					6	45,2	0,976	2,040	18,0	51,4	51,4
					5	45,2	0,682	1,418	16,5	100	100
					6	45,2	0,632	1,244	18,0	17,1	51,4
					$5 \cdot 10^{-9}$	45,2	0,541	0,878	16,5	50	100
Eo 4	9,7	82,9	1,84	$7,8 \cdot 10^{-9}$	7,35	0,0147	0,18	19,0	30	30	
					17,56	0,0636	0,42	19,0	30	30	
					22,1	0,106	1,04	19,0	30	30	
					29,38	0,180	1,40	19,0	30	30	
					35	0,214	1,28	19,0	30	30	
					58,76	0,606	1,90	19,0	30	30	
					117,52	1,37	2,865	19,0	30	30	
					11,3	0	0	18,8	10	35	
					23,0	0,030	0,23	18,8	10	35	
					45,0	0,133	--	18,8	10	35	
					90,0	0,386	0,900	18,8	10	35	
					11,3	0,004	0,033	18,8	20	35	
					22,0	0,0095	0,10	18,8	20	35	
45,0	0,192	0,825	18,8	20	35						

TABELL 3 Fortsättning

Material	Salthalt ‰	w %	ρ Ω m	k_e m^2/sV	I mA	\dot{s} mm/h	Δh mm	h_o mm	σ' kPa	σ'_c kPa
Eo 4	9,7	82,9	1,84	$7,8 \cdot 10^{-9}$	11,3	0	0	18	10	50
					11,3	0	0,034	18	20	50
					11,3	0	0,011	18	30	50
					12,3	0,0096	0,268	18	40	50
					12,2	0,0222	0,402	18	50	50
					22,6	0,0193	0,078	18	10	50
					37	0,0802	0,655	18	20	50
					22,5	0,0398	0,365	18	30	50
					22,6	0,0385	0,46	18	40	50
					22,5	0,0843	0,80	18	50	50
					45,6	0,108	0,522	18	10	50
					45,2	0,134	0,753	18	20	50
					45,2	0,176	0,712	18	30	50
					45,2	0,211	0,944	18	40	50
					45,2	0,265	1,357	18	50	50
					90,4	0,284	0,82	18	10	50
					90,4	0,470	1,261	18	20	50
90,4	0,66	1,348	18	30	50					
90,4	0,767	1,57	18	40	50					
90,4	0,945	1,918	18	50	50					
Eo 5	10,0	82,6	1,504	$8 \cdot 10^{-9}$	11,3	0,0182	0,55	18,8	35	35
					22,3	0,0897	1,0	18,8	35	35
					40	0,291	1,45	18,8	35	35
					66	0,536	1,63	18,8	35	35
					101	1,02	1,98	18,8	35	35
Eo 6	8,15	83,88	2,13	$8 \cdot 10^{-9}$	11,4	0,0284	0,523	18,8	30	35
					22,6	0,1038	1,100	18,8	30	35
					45,2	0,316	1,76	18,8	30	35
					92,5	1,225	3,05	18,8	30	35
Eo 7	0,1	34,7	63	$2,1 \cdot 10^{-9}$	5,2	0,365	0,565	18,9	30	30
					10	0,561	0,895	18,9	30	30
					15	0,9898	0,79	18,9	30	30
					20	2,37	0,87	18,9	30	30
					30	2,114	0,77	18,9	30	30
					1	0,0375	0,206	18,9	30	30

TABELL 3 Fortsättning

Material	Salthalt ‰	w %	ρ Ω m	k_e m^2/sV	I mA	\dot{q} mm/h	Δh mm	h_o mm	σ' kPa	σ'_c kPa
Eo 8	26,2	88,7	0,90	$9 \cdot 10^{-9}$	40	0,033	--	18,3	30	30
					80	0,075	--	18,3	30	30
Eo 9	29,2	84,8	0,85	$8,5 \cdot 10^{-9}$	40	0,028	--	18,2	30	30
					80	0,053	--	18,2	30	30
Eo 10	3,6	41,8	7,89	$3 \cdot 10^{-9}$	5,2	0,274	1,208	18,9	30	30
					10,1	0,49	--	18,9	30	30
					20	1,88	2,35	18,9	30	30
Eo 11	1,9	39,1	15,2	$3 \cdot 10^{-9}$	5	0,263	0,974	18,9	30	30
					10	0,550	0,991	18,9	30	30
					20,5	1,975	1,50	18,9	30	30

8.1 Jordresistivitet

Jordresistiviteten ρ beror i huvudsak på lermineral, porositet och salthalten i porvattnet.

I en lera har de fasta partiklarna negativ ytladdning och attraherar positiva joner från porvattnet varigenom ett ledande skikt längs lerpartikelns yta uppstår. Dessutom är porvätskan ledande.

Det har visats att för en given por som är fylld med vätska och där de motstående väggarna är någorlunda parallella är λ (porvätska + λ (leryta) = λ (vätskefylld por), Penner (1965). Eftersom $\lambda = \frac{1}{R}$ skulle alltså resistiviteten bero på porvätskans ledningsförmåga och porositeten. En sammanställning av egna försöksdata och data framräknade ur Penners försök visar att detta stämmer mycket väl, bortsett från de material vars porvätska har en mycket låg salthalt och ledningsförmåga.

Försöken visar att för material med en salthalt i porvattnet högre än 2 o/oo beror resistiviteten helt på salthalten och porositeten och kan fås ur diagram. För material med lägre salthalt kan endast generellt sägas att resistiviteten är hög, och den måste bestämmas experimentellt från fall till fall. Salthalten har mätts på utpressat porvatten med ett philoscope.

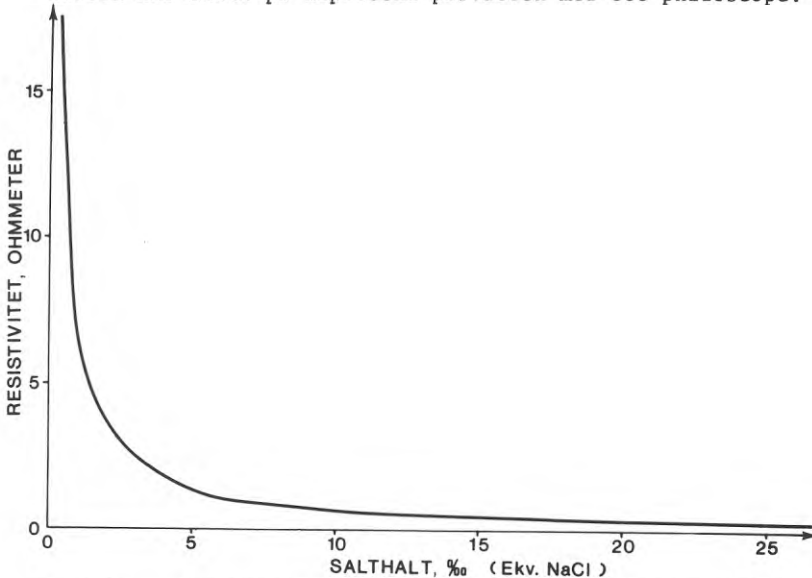


FIG.19. Resistivitet i porvatten som funktion av salthalt
Resistivity in porewater as a function of salinity

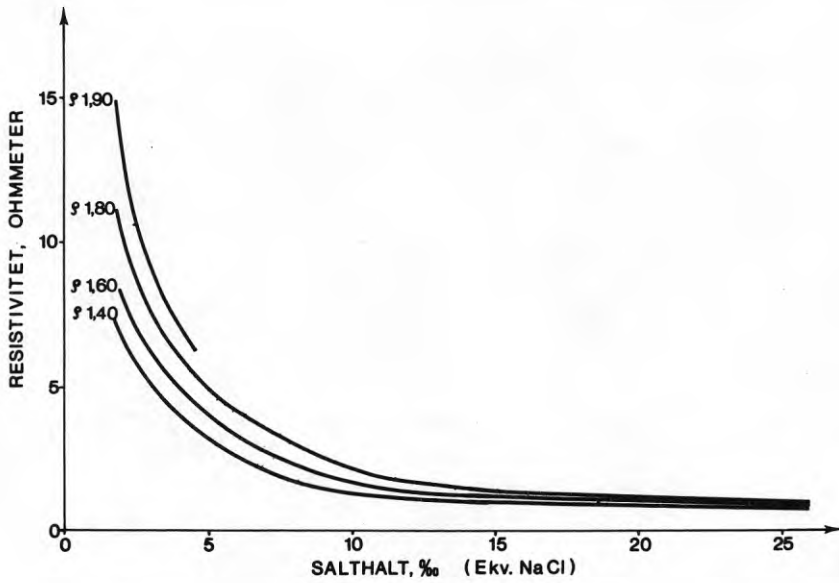


FIG.20. Resistivitet i lera som funktion av salthalt och densitet
Resistivity in clay as a function of salinity and density

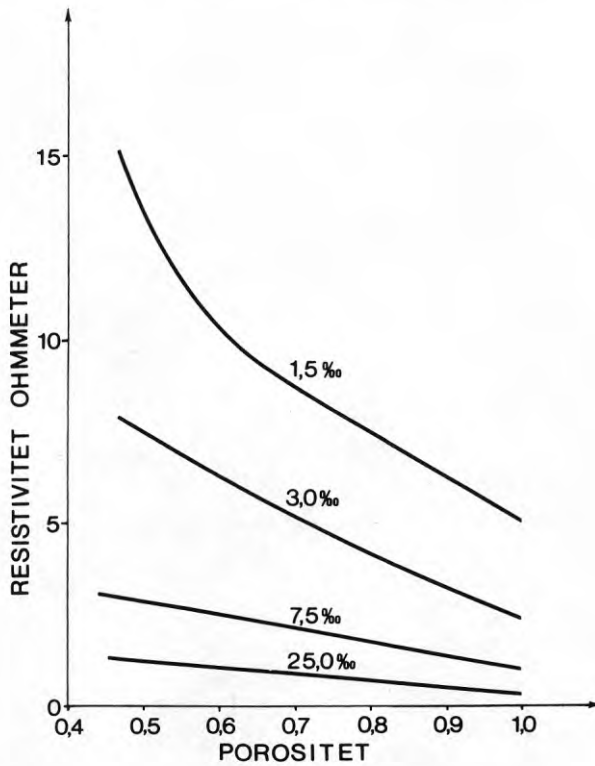


FIG.21. Resistivitet i lera som funktion av porositet och salthalt
Resistivity in clay as a function of porosity and salinity

8.2 Elektroosmotisk permeabilitetskoefficient

Gray & Mitchell (1967) har visat att den elektroosmotiska permeabilitetskoefficienten k_e beror på lermineral, vattenkvot och salthalt. Salthalten inverkar endast i högre grad om lermineralet är inaktivt, dvs har låg jonbyteskapacitet. Lermineralet i våra marina leror är som regel illit. Illit är ett aktivt mineral och påverkan av salthalten på k_e är således liten. En jämförelse mellan Gray & Mitchells kurvor och de värden på k_e som uppmätts för svenska och norska leror visar en god överensstämmelse.

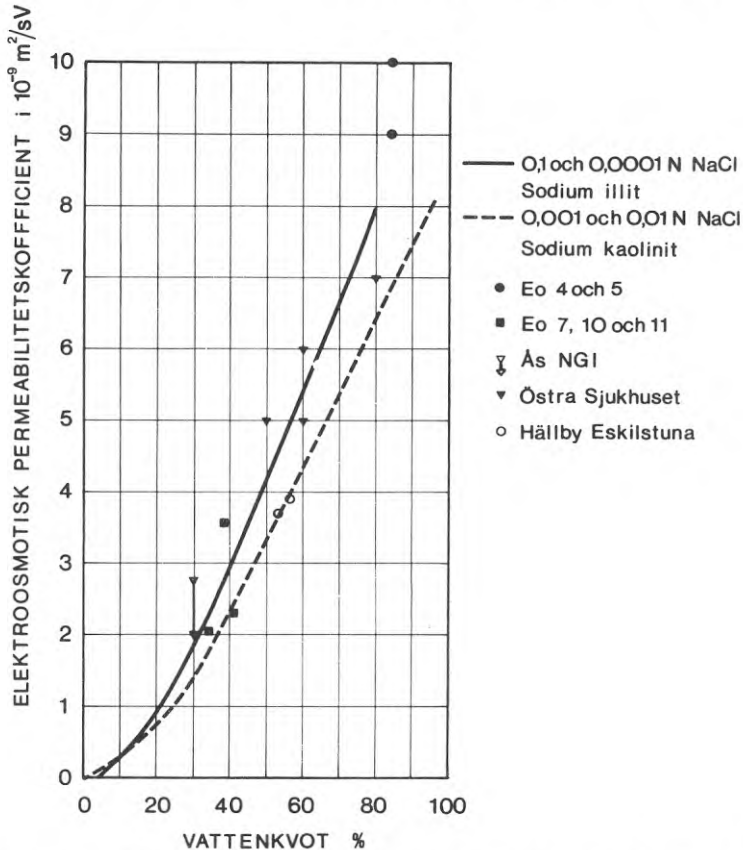


FIG.22. Elektroosmotisk permeabilitetskoefficient k_e som funktion av vattenkvot

Electroosmotic permeability k_e as a function of water content

Den elektroosmotiska permeabilitetskoefficienten k_e kan alltså för praktiska syften sägas bero endast på lerans vattenkvot och kan fås direkt ur diagram.

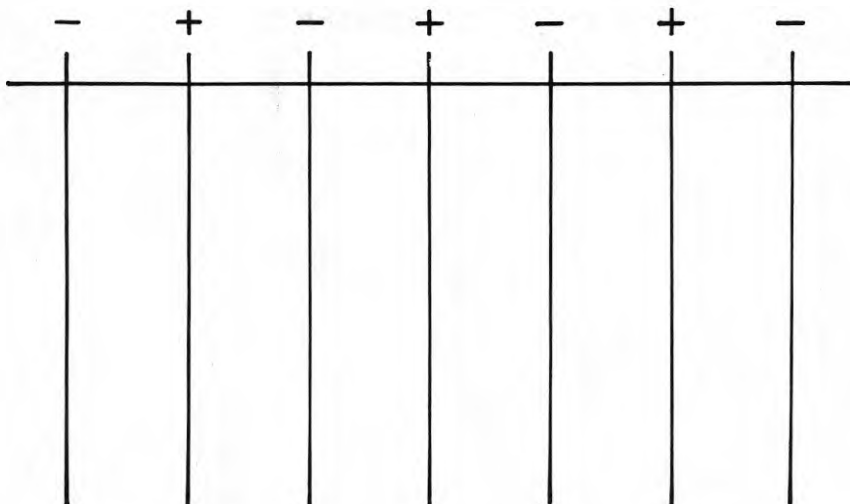


FIG.23. Elektroosmosfält
Field with electrodes

Om man i ett lerlager för ned rader av elektroder och kopplar dem växelvis som anoder och katoder vill vattnet strömma från anod till katod, vattentrycket börjar därför sjunka vid anoderna och effektivtrycket ökar. Materialet konsoliderar.

Denna konsolidering är ett successivt förlopp så tillvida att porvattentrycket sjunker allt efter som materialet konsoliderar och ökar sitt motstånd mot sammanpressning.

Teoretiskt slutstadium

Konsolideringen slutar teoretiskt då ett så stort porvattenundertryck uppstått vid anoden att den hydrauliska vattenströmningen motsvarar den elektroosmotiska. Porvattentrycksprofilen skall då bli följande

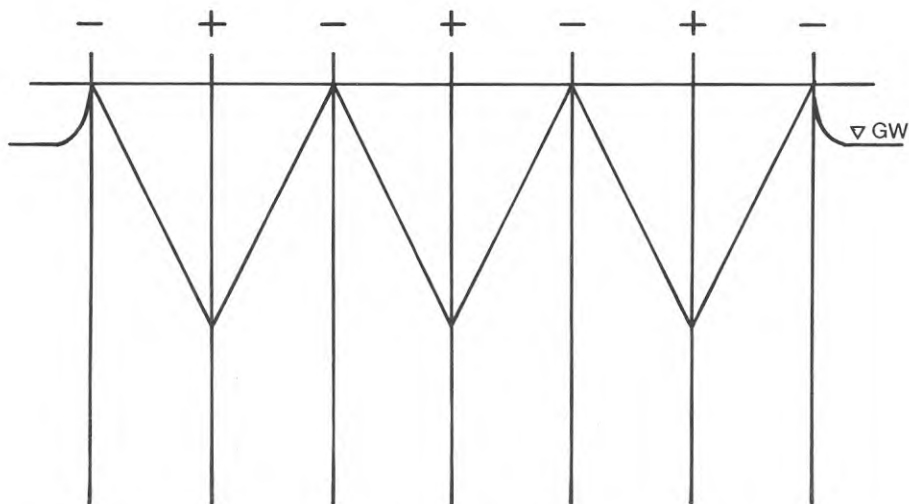


FIG.24. Porvattentrycksprofil efter elektroosmos
Distribution of porewater pressure after electroosmosis

Om materialet saknar skjuvhållfasthet skulle sättningens bilden blivit densamma. På grund av påhängskrafter och hållfasthetsökning vid anoderna blir sättningen vid normala elektrodavstånd istället denna

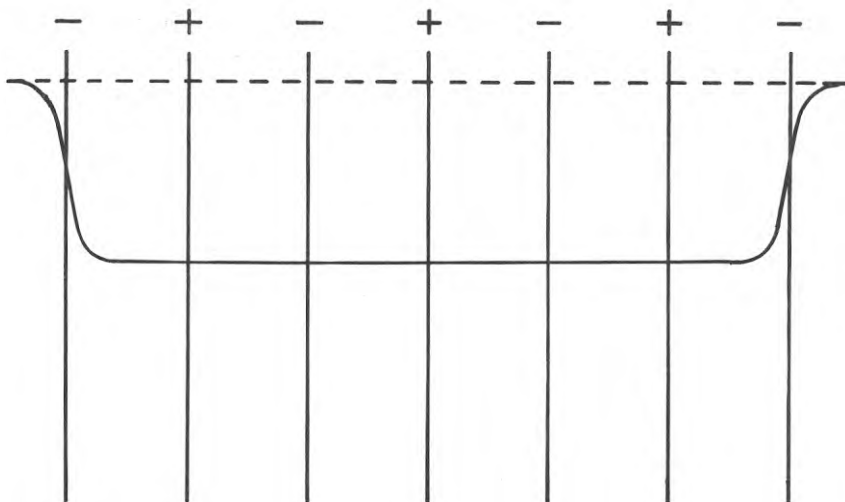


FIG.25. Sättning efter elektroosmos
Settlement after electroosmosis

För att kunna göra en teoretiskt korrekt bestämning av sättningsförloppet vid elektroosmos måste hänsyn tagas till att

1. Jordresistiviteten ändras med kompressionen. I salta leror omfördelas saltet mellan anod och katod så att spänningsfallet inte är linjärt.
2. Den elektroosmotiska permeabilitetskoefficienten ändras med minskande vattenkvot.
3. Permeabiliteten ändras med minskande porvolym.
4. Materialets ursprungliga kompressionsegenskaper ändras. En hållfasthetsökning inträffar vid anoden och hos salta leror kan en betydande försvagning uppstå vid katoden.
5. Sättningsförlöppet följer inte effektivtrycksfördelningen på grund av att skjuvspänningar omdistribuerar krafterna.

En teoretiskt korrekt bestämning kan i dag inte göras. Ur praktisk synvinkel är den inte heller särskilt intressant då det teoretiska slutstadiet i en normal svensk lera med normala elektrodavstånd uppnås först efter mycket lång tid.

Sättningsförloppet i praktiken

Vid såväl fält- som laboratorieförsök har det visat sig att om lera konsolideras med elektroosmos och strömstyrkan hålls konstant fås till en början en konstant sättningshastighet. Denna hastighet förblir konstant tills cirka 60 % av slutsättningen uppnåtts och avtar därefter. Endast den del av sättningsförloppet där hastigheten är konstant torde ha något praktiskt intresse. Konsolideringsförloppet för praktiskt bruk kan således skrivas: Vid konstant strömstyrka erhålls en konstant hastighet på medelsättningen av markytan.

8.4 Ekvivalent konsolideringstryck

Vid motriktad hydraulisk och elektroosmotisk vattenströmning gäller jämviktsläget

$$k_e \frac{\Delta U}{\Delta x} = \frac{k}{g\rho_w} \frac{\Delta u}{\Delta x} \quad (20)$$

Detta är också ekvationen för slutstadiet för elektroosmotisk konsolidering. Under konsolideringen förändras dock k , k_e och ρ . Andra egenskaper hos materialet förändras också av elektroosmos.

Vid jämvikt är portrycksskillnaden Δu mellan anod och katod

$$\Delta u = \frac{k_e g \rho_w}{k} \Delta U \quad (21)$$

I elektroödometern har portrycket vid katoden hela tiden hållits vid noll varför medeleffektivtrycksökningen i provet blir

$$\Delta \sigma'_v = \frac{1}{2} \frac{k_e g \rho_w}{k} \Delta U \quad (22)$$

En jämförelse mellan beräknat $\Delta \sigma'_v$ med användande av k , k_e och ρ hos materialet före elektroosmos enligt ekv. (22) och den effektivtrycksökning som enligt ödometerkurvan motsvarar uppmätt kompression har gjorts för försök i ödometer. TABELL 4.

I tabellen synes spridningen vara ganska stor, men om de osäkraste och mest svårkalkylerade värdena, dvs de lägsta och högsta spänningarna plockas bort är överensstämmelsen mellan mätta och beräknade värden ganska god.

Man kan alltså nöjaktigt beräkna den portrycksförändring mellan anod och katod en viss spänning ger i slutstadiet med ekv. (22). Den beräknade tryckskillnaden är dock räknad mot trycket vid katoden men vilken verklig effektivtrycksändring vi får beror på vad som händer med trycket vid denna. Den verkliga medeleffektivtrycksändringen blir

$$\Delta \sigma'_v = \frac{1}{2} \frac{k_e g}{k} \Delta U - \Delta u_k \quad (23)$$

där Δu_k är portrycksändringen vid katoden.

Om ingen pumpning sker i katoden är $\Delta u_k =$ skillnaden mellan det tryck som motsvarar en grundvattennivå i markytan och initieellt porvattentryck vid katoden.

Om elektroosmosen kombineras med pumpning i katoden motsvarar $-\Delta u_k$ sänkningen av grundvattentrycket vid katoden. Det ekvivalenta konsolideringstrycket används vid beräkningen av sättningshastigheten.

TABELL 4. Elektroödometerförsök

Material	ΔU	$\Delta \sigma'_v$ x)	$\Delta \sigma'_v / \Delta U$	Beräknat enl ekv (22)	$\Delta \sigma'_v / \Delta U$
Eo1	0,091	9	98,9	60	
	0,182	13	71,42		
	0,364	19	52,20		
	0,728	36	49,45		
Eo2	0,137	7,5	54,74	60	
	0,274	17	62,04		
	0,547	31,5	57,6		
	1,029	52,5	51,02		
	1,500	70	46,67		
Eo4	0,091	3	32,96	68,3	
	0,180	7	38,88		
	0,273	19	69,60		
	0,363	28	77,13		
	0,433	25	57,74		
	0,727	43	59,14		
	1,454	79	54,33		
Eo5	0,660	42	63,6	54,5	
	1,01	56	55,4		
Eo6	0,161	15	93,16	71	
	0,320	30	93,75		
	0,640	48	75		
	1,311	97	73,95		
Eo4	0,138	7,5	54,35	68,3	
	0,269	15	55,76		
	0,281	26	92,5		
	0,551	31	56,26		
	0,551	31	56,26		
	1,101	60	54,05		
	1,101	68	61,76		
	0,132	3	22,72		
	0,132	6	45,45		
	0,143	11	76,92		
	0,144	16	111,11		
	0,264	28	106,06		
	0,264	23	87,12		
	0,265	22	83,0		
	0,434	44	101,38		
	0,530	47	88,7		
	0,530	39	73,58		
	0,530	37	69,8		
	0,530	41	77,36		
	0,534	44	82,39		
1,059	55	52,0			
1,059	63	59,5			
1,059	59,5	56,2			
1,059	60	56,65			
1,059	65	61,4			

x) = motsvarande uppmätt kompression

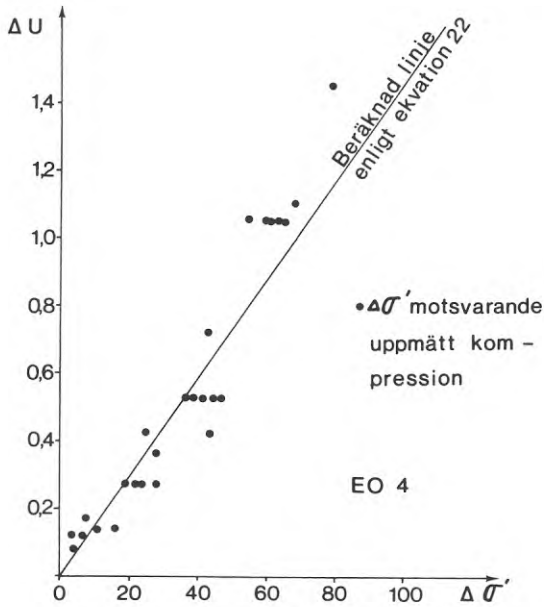


FIG.26. Ekvivalent konsolideringstryck som funktion av potentialfall mellan anod och katod
Equivalent consolidation pressure as a function of voltage between clay at the anode and clay at the cathode

För att konsolidering skall ske fordras att

$$\Delta\sigma'_v = \frac{1}{2} \frac{k_{eg}}{k} \Delta U - \Delta u_k > \sigma'_c - \sigma'_o$$

Uppfylls inte detta villkor kan man för överkonsoliderade material få en hävning av marken.

8.5 Inverkan av permeabla skikt

Om jordmaterialet är inhomogent och innehåller permeabla skikt fås

en störning i konsolideringen. På grund av den porvattentrycks-skillnad som byggs upp mellan katod och anod strömmar vatten tillbaka från katoden i de permeabla skikten och återinfiltreras i den tätare leran. Detta illustreras väl i modellförsök Eo6. Vid strömstyrkan 50 mA erhöles snabbt ett stabilt tillstånd där lika mycket vatten som transporterades till katoden strömmade tillbaka i sandskiktet. Strömstyrkan ökades till 100 mA och vid försökets avbrytande hade nästa stabila tillstånd börjat inträda.

I naturen underlagras ofta lera av permeablare jordar. Även torrskorpan kan genom sprickighet släppa igenom vatten. Enstaka skikt gör dock inte så mycket då djupverkan av återinfiltrationen är måttlig. Vid varviga jordar är situationen en annan. Där måste beräkningarna göras med hänsyn till de mest permeabla skikten. I allmänhet måste elektroosmosen här kombineras med pumpning vid katoden. Vid denna kombination används elektroosmosen för att påskynda den sättning som grundvattensänkningen genom pumpningen med tiden skulle givit upphov till. Att fortsätta elektroosmosen efter det att denna sättning erhållits blir oftast utan resultat.

8.6 Sättningshastighet

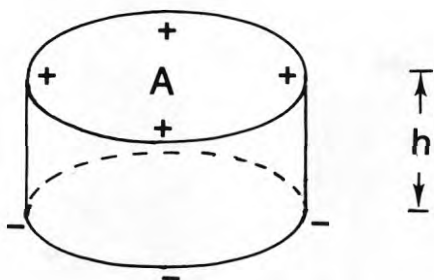
För att bestämma sättningshastigheten har en modell för effektförlusterna i leran vid elektroosmos skisserats.

Vid vattentransport och konsolidering utträttas ett arbete.

Vid elektroosmotisk vattengenomströmning gäller

$$v_x = \frac{k_e \Delta U}{\Delta x} x \quad (24)$$

I elektroödometern fås



$$v = \frac{k_e R I}{h} \text{ vilket ger} \quad (25)$$

$$R I^2 = \frac{v h I}{k_e} \quad (26)$$

$\frac{v h I}{k_e}$ är den effekt som åtgår för den elektroosmotiska vattentransporten.

Vid konsolidering i elektroödometern fås en triangulär sättningsfördelning. Medeltransportvägen för det borttransporterade porvattnet blir då $2/3 h$.

Den effekt som krävs för denna vattentransport blir $\frac{2}{3} \frac{\dot{s} h I}{k_e}$

Konsolideringseffekt

För att materialet skall konsolidera krävs en effektivtrycksökning. Denna åstadkoms genom att porvattentrycket sjunker då vattnet dras ur porerna. Hur stor effekt som åtgår för att dra ut vattnet kan antas bero på hastigheten, tvärsnittsytan och materialets kraft/deformationsegenskaper.

Den effekt som krävs för konsolidering kan då skrivas som $\dot{s} A M c_e$.

M är sekantmodulen för medeleffektivtrycksändringen i provet under hela konsolideringsfasen

$$M = \frac{\Delta \sigma'}{\Delta \epsilon} \text{ kPa}$$

$$\text{där } \Delta \sigma' = \frac{1}{2} \frac{g k_e}{k} \Delta U - \Delta u_k$$

och $\Delta \epsilon$ relativa kompressionen enligt ödometerdiagram mellan σ'_0 och $(\sigma'_0 + \Delta \sigma')$. c_e är en materialkonstant.

Antas övriga effektivförluster som uppvärmning och gasbildning kunna räknas in i övergångsförlusterna mellan elektrod och lera kan effektförbrukningarna i själva leran skrivas

$$\frac{\rho h I^2}{A} = \frac{\dot{s} h I}{3 k_e} + \dot{s} A M c_e \quad (27)$$

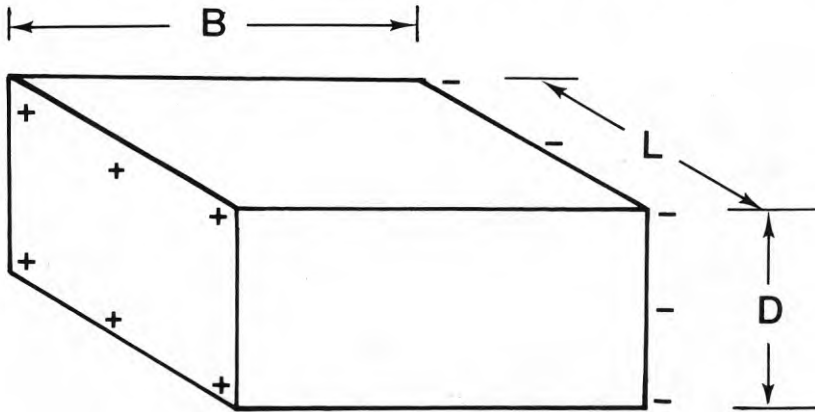
$$\frac{\rho h I^2}{A} = \left\{ \frac{h I^2}{3 k_e} + A M c_e \right\} \dot{s} \quad (28)$$

Detta gäller i startögonblicket när ingen hydraulisk gradient finns.

Under elektroosmosen förändras ρ , h , k_e och M . Dessutom byggs en motriktad hydraulisk vattenströmning upp. Vid försök har det dock visat sig att hastigheten vid konstant strömstyrka är konstant under större delen av konsolideringsfasen. Förändringarna får därför till en början antas kompensera varandra.

Ovanstående formler gäller då sättning och vattenströmning går i samma riktning.

Då vattenströmning och sättning går i olika riktning gäller



$$v_h D L = \dot{s} L B \quad (29)$$

$$v_h = \dot{s} \frac{B}{D} \quad (30)$$

$$\frac{\rho B I^2}{L D} = \dot{s} B \left\{ \frac{2 B I}{3 k_e D} + L M c_e \right\} \quad (31)$$

där v_h = horisontell vattenströmningshastighet, m/s

\dot{s} = vertikal medelsättningshastighet, m/s

B = avstånd mellan elektrodrader, m

L = elektrogradens längd, m

D = effektiva verkningsdjupet hos en elektrograd, m

Denna modell har testats för samtliga försök.

I försöken har olika strömstyrkor använts. Variationen för ett material har varit upp till 30 gånger. Dessutom har överkonsolideringsgraden varierats och M-värdena har därmed varierat mycket kraftigt. Trots dessa variationer har modellen visat sig stämma mycket väl för såväl elektroödometerförsök som modellfält. Faktorn c_e är en materialkonstant som varierar med salthalten i porvattnet. (FIG.27).

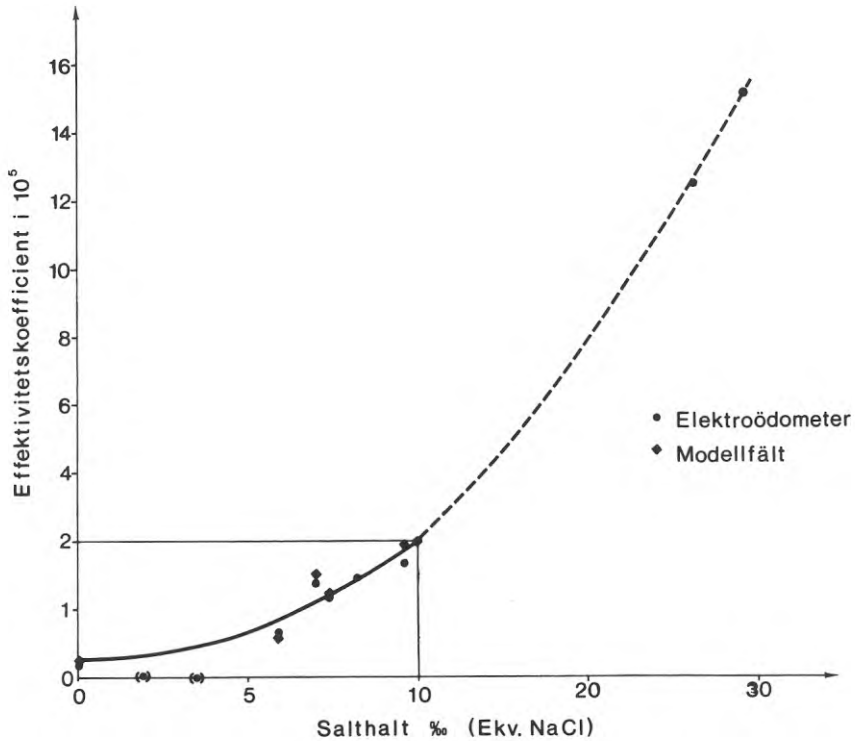


FIG.27. Effektivitetskoefficienten c_e som funktion av salthalt i porvattnet
Coefficient of efficiency as a function of salinity

Att c_e -värdena för försöken med en salthalt av 1,9 o/oo respektive 3,6 o/oo blev nära noll beror förmodligen på att leran urlakats av strömmen och att strukturen kollapsat. Så låga c_e -värden kan fås i elektroödometern där dräneringsvägarna är korta men knappast i fält. (Jfr med kombinerad pumpning vid katoden och elektroosmos i modellförsök Eo3). Vid mycket höga salthalter kan sättnings-hastigheten efter långt driven behandling öka. Detta beror troligen på att salterna i provet drivits ut. Ökningen kommer först efter mycket lång tid och är knappast praktiskt möjlig att utnyttja.

Beräkning av sättningshastighet i Ås

En kontrollberäkning av sättningshastigheten vid fullskaleförsök i Ås i Norge (Bjerrum, Moum & Eide, 1968) visar att beräkningsmodellen är användbar även i full skala.

Ur uppgivna materialdata fås

$$\begin{aligned}k &= 2 \cdot 10^{-10} \text{ m/s} \\k_e &= 2,8 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{sV} \\ \rho &= 47 \text{ } \Omega\text{m}\end{aligned}$$

Avstånd mellan anod och katod var 2 m.

Elektrogradens längd var 11 m och effektiva verkningsdjupet 9,6 m. Den totala strömstyrkan över 9 fält var 210 A vilket ger 23,5 A/fält.

Spänningsfallet i leran mellan anod och katod fås ur

$$U = \frac{\rho}{L D} I = \frac{47 \cdot 2}{11 \cdot 9,6} 23,4 = 20,8 \text{ V}$$

Det ekvivalenta konsolideringstrycket fås ur ekv. (23)

$$\Delta \sigma' = \frac{1}{2} \frac{k_e g \rho_w}{k} \Delta U - \Delta u_k$$

$$\Delta \sigma' = \frac{1}{2} \frac{2,8 \cdot 10^{-9} \cdot 9,81 \cdot 1}{2 \cdot 10^{-10}} 20,8 - 0 = 1430 \text{ kPa}$$

Ur materialets ödometerkurva fås att relativa kompressionen för en ökning av effektiva vertikalktrycket från σ'_0 till $\sigma'_0 + 1430 \text{ kPa}$ blir ca 18 %.

$$\text{Modulen blir } \frac{1430}{0,18} = 8 \cdot 10^3 \text{ kPa}$$

Salthalten i porvattnet i Ås var 0,9 o/oo vilket ger $c_e = 0,25 \cdot 10^5$. Sättningshastigheten beräknad med ekv. (31) blir

$$\frac{\rho B I^2}{L D} = \dot{s} B \left\{ \frac{2 B I}{3 k_e D} + L M c_e \right\}$$

$$\frac{47 \cdot 2 \cdot 23,4^2}{11 \cdot 9,6} = \dot{s} 2 \left\{ \frac{2 \cdot 2 \cdot 23,4}{3 \cdot 2,8 \cdot 10^{-9} \cdot 9,6} + 11 \cdot 8 \cdot 10^3 \cdot 0,25 \cdot 10^5 \right\}$$

$$\dot{s} = 0,726 \cdot 10^{-7} \text{ m/s} =$$

$$= 6,3 \text{ mm/d}$$

Den uppmätta sättningen i fält efter 14 dagar var 100 mm vilket ger en sättningshastighet av 7,2 mm/d.

Efter 18 dagar ändrades strömstyrkan och hölls inte längre konstant, varför några vidare slutsatser ej kan dras.

8.7 Förändringar av leras geotekniska egenskaper

Vid försök i fält med elektroosmos har det visat sig att lerornas egenskaper efter försöken ofta kraftigt varierar mellan anod och katod. Skjuvhållfasthet och förkonsolideringstryck är högst vid anoden och lägst vid katoden. Ökningen vid anoden är ofta mycket större än vad vattenkvotminskningen motsvarar. Vid katoden kan hållfasthet och förkonsolideringstryck sjunka trots att vattenkvoten minskar. Sensitiviteten vid katoden kan öka mycket kraftigt och kvicklera bildas. Materialets konflytgräns ökar kraftigt

vid anoden och minskar vid katoden.

Samma förändringar uppstår vid modellfältförsöken. Här har det visat sig att förändringarna är mycket stora i de salta materialen. Material Eo7 som är i det närmaste fritt från salt uppvisar inte några större förändringar bortsett från den ökning i hållfasthet och förkonsolideringstryck som beror på vattenkvotminskningen.

Förändringarna i modellförsöken kan inte bero på yttre faktorer och jonbyten då elektroderna är av platina och ingenting som kan reagera med leran står i kontakt med denna.

I fält fås en ytterligare hållfasthetsökning närmast anoden då anoden förbrukas och metalljonerna går ut i leran.

Variationerna i lerans egenskaper kan elimineras genom att vända strömriktningen och en konsolidering av materialet kan ske utan biverkningar även för salta leror (Modellfält Eo4).

För att utröna vad som förorsakat variationerna har material Eo5 undersökts speciellt efter modellfältförsök.

Undersökningar beträffande salthalten i porvattnet visar att de lösliga salterna går mot anoden medan katoden blir i det närmaste fri från salt.

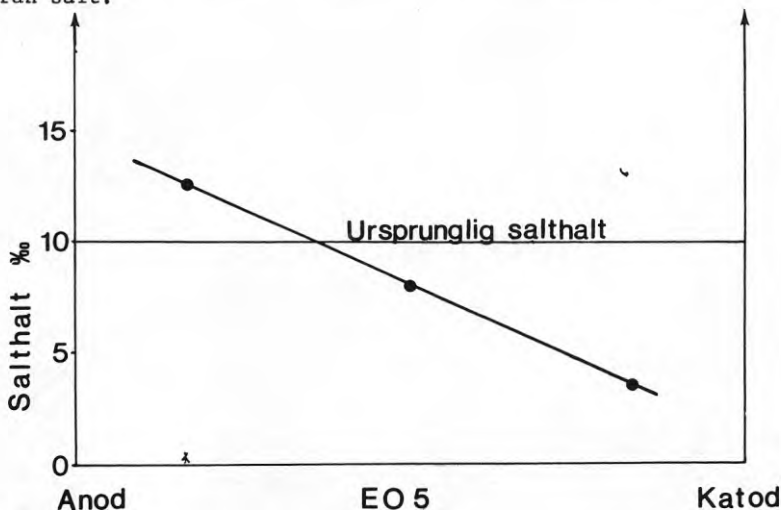


FIG.28. Salthalt beräknad ur porvattnets resistivitet
Salinity evaluated from the porewater resistivity

Färgen på det urpressade porvattnet tyder på att vattenlösliga humusämnen kan ha bildats vid katoden.

För att utröna om någon partikelvandring och ändring av kornfördelningskurvan skett har omfattande sedimentationsanalyser utförts. Ingen skillnad i kornfördelning mellan originalmaterialet och material från någon punkt i provet har kunnat konstateras. Material från olika delar av provet och originalmaterialet har studerats och jämförts i svepelektronmikroskop. Ingen påtaglig skillnad har kunnat påvisas.

Också på material Eo7 har omfattande sedimentationsanalyser utförts. Inte heller där har någon skillnad kunnat upptäckas.

En jämförelse mellan de förändringar i leras egenskaper som uppstår vid urlakning och de som uppstår vid elektroosmos visar att de förändringar som uppstår vid katoden mycket väl kan förklaras genom omfördelningen av salterna och salthaltsminskningen vid katoden. Om motsvarande ökning av salthalten i en lera leder till förstärkning och ökning av flytgränsen är ej känt.

Humusämnen som bildas vid katoden kan verka dispergerande och bidra till ökningen i sensitivitet.

Om elektroosmosen drivs långt utan att strömriktningen vänds fås med tiden skjuvbrott vid katoden på grund av att påhängskrafterna blir för stora. Dessa skjuvspänningar bidrar till att bryta ned strukturen i leran vid katoden.

De största förändringarna synes dock bero på urlakning.

Om en lera behandlas med en så svag likström att ingen konsolidering sker urlakas dock materialet och kan slutligen brytas ned vid katoden. Detta illustreras i modellförsök Eo5 där strömstyrkan från början var mycket låg. Efter en tids behandling börjar materialet plötsligt sätta sig vid katoden och vid försökets slut var sättningen större vid katod än anod. Detta har ingen annan förklaring än att materialets struktur brutits ned och förkonsolideringseffekterna försvunnit. Enligt undersökningar

av Torrance (1974 och Penner (1965) sker denna nedbrytning när salthalten sjunker under 2 o/oo.

Vid försök i elektroödometern på materialen Eo10 och Eo11 med salthalterna 1,9 respektive 3,6 o/oo erhöles en sättningshastighet som översteg den för fri vattengenomströmning. Den hastighet som erhöles var densamma som skulle erhöles om elektroosmosen kombinerats med en lastökning. Salthalterna i dessa prover ligger nära den kritiska gränsen och det verkar som om elektroosmosen samtidigt med vattentransporten brutit ned förkonsolideringseffekten. Ett sådant förlopp är bara möjligt i elektroödometern där ström och sättning går i samma riktning och är inte applicerbart på fältförhållanden.

De variationer som uppstår i lerans egenskaper efter elektroosmos är ej önskvärda. De mycket höga hållfastheterna vid anoden kan inte räknas som permanenta då jondiffusion med tiden äger rum och salthalterna kommer att utjämnas.

Även om inte strömriktningen ändras under själva konsolideringen bör varje försök avslutas med en vändning av strömmen. Denna sista fas bör få verka så länge att man med vingsondens hjälp kan konstatera att hållfastheten vid den gamla katoden uppgår till godtagbara värden och sensitiviteteten gått ned.

Inverkan av snäckskal

Vid försök med elektroosmos vid Östra sjukhuset i Göteborg visade sig gasutvecklingen i ett snäckskalslager vara så kraftig att en hävning uppstod. Samma gasutveckling konstaterades i laboratoriet. Konsolidering av lera med riklig inblandning av snäckskal måste därför avrådas.

8.8 Allmänt om dimensionering

För beräkning av effekten av elektroosmotisk avvattning erfordras:

- En bestämning av jordlagerföljden och grundvattenytans läge
- Rutinundersökning av jordprover
- Ödometerförsök med bestämning av permeabilitet
- Resistivitetmätning

Ur vattenkvoten bestäms k_e och med hjälp av resistiviteteten kan

salthalten bestämmas.

Med hjälp av jordlagerföljden och grundvattenytans läge bestäms om pumpning vid katoden är nödvändig. Pumpningen påskyndar i sig själv inte vattentransporten till katoden i någon större grad i tätta leror utan behövs bara då risk för återströmning förekommer och då grundvattenytan ligger djupt under markytan.

Elektroosmosfältet dimensioneras preliminärt.

Tillgången på likström undersöks. Den vanligaste likströmskällan är svetstransformatorer. Elektrodarean kontrolleras så att villkoret att strömtätheten ej överstiger 20 A/m^2 uppfylls.

Övergångsmotståndet mellan elektrodrader och lera och resistansen i lera beräknas.

Vid kontroll av att tillgänglig spänning är tillräcklig bör hänsyn tas till att ledningsmotståndet i lera kommer att öka.

Spänningsfallet i lera och ekvivalent konsolideringstryck beräknas. Ur ödometerkurvan bestäms M . Sättningshastigheten beräknas med hjälp av effektformeln. (Ekv.31).

Om sättningshastigheten är tillfyllest kontrolleras att man vid önskat slutstadium ej nått 60 % av slutsättningen.

Anodförbrukningen kontrolleras.

Om kraven på sättningshastighet eller anodförbrukning ej uppfylls får fältet omdimensioneras.

Elektroosmos är en metod att snabbt stabilisera jord. Under försöket binds likströmskällorna och försöket kräver noggrann övervakning. Det finns därför normalt ingen anledning att försöka spara energikostnader genom att använda låga strömstyrkor och låta försöket ta längre tid. Som framgår av effektformeln är det bara vid mycket höga strömstyrkor som någon egentlig besparing kan ske. Om försöket avbryts förloras en del av den uppbyggda portrycksgradienten och en tid åtgår efter återupptagandet innan

konsolideringen är i full gång igen. Som framgår av avsnitt 8.7 "Förändringar i leras geotekniska egenskaper" kan det vara direkt olämpligt att använda för låga strömstyrkor.

- Bjerrum, L, Moun, J & Eide, O, 1968, Application of Electro-osmosis to a Foundation Problem in a Norwegian Quick Clay. NGI Publ. 74.
- Casagrande, L, 1953, Review of Past and Current Work on Electro-osmotic Stabilization of Soils. Harvard Soil Mechanics. Series, 38.
- Esrig, M, 1968, Pore Pressures, Consolidation and Electro-Kinetics, ASCE Proc.
- Fetzer, C, 1967, Electro-osmotic Stabilization of West Branch Dam. ASCE, Proc.
- Fredén, S, 1962, Fältförsök med elektroosmotisk avvattning av lera. Statens Vägintstitut, Specialrapport 19, 1962.
- Gray, D & Mitchell, J, 1967, Fundamental Aspects of Electro-osmosis in Soils. ASCE, Proc.
- Hansbo, S, 1970, Erfarenheter från avvattningsförsök med elektro-osmos i några svenska leror. Byggforskningen, Rapport R19:1970.
- Kopfmüller, K, 1959, Einführung in die theoretische Elektrotechnik. 6:e uppl. p. 43, Springer Verlag, Berlin.
- Mitchell, J, 1970, In-Place Treatment of Foundation Soils. ASCE Proc.
- Moun, 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. Philips Res. Rep. 13.

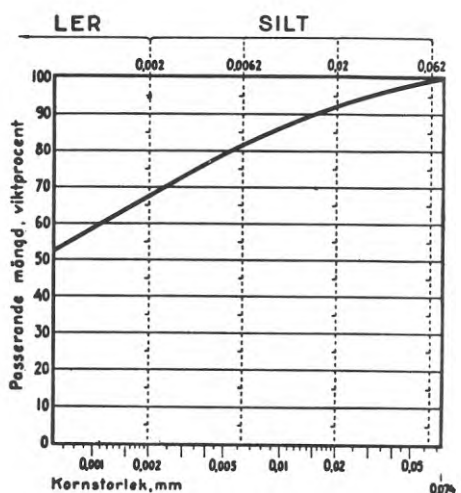
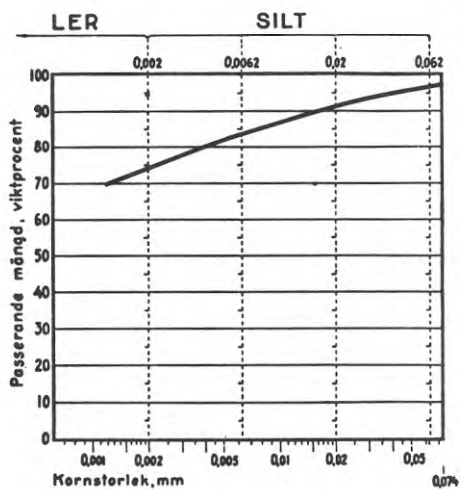
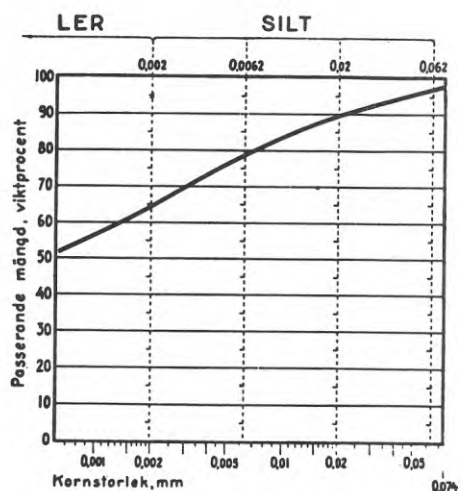
- Penner, E, 1965, A Study of Sensitivity in Leda Clay. Canadian Journal of Earth Sciences. Vol. 2, No. 5, p. 425.
- Pusch, R, 1973, Influence of Organic Matter on the Geotechnical Properties of Clays. Byggeforskningen Document D11:1973.
- Schaad, W, 1958, Praktische Anwendung des Elektro-Osmose in Gebiete des Grundbaues. Bautechnik 35:6, 11:210-216, 420-429.
- Söderblom, R, 1974, Organic Matter in Swedish Clays and its Importance for Quick Clay Formation. SGI, Proc. 26.
- Torrance, J, K, 1974, A Laboratory Investigation of the Effect of Leaching on the Compressibility and Shear Strength of Norwegian Marine Clays. Géotechnique, Vol.24, No. 2.
- Tovey, K, 1970, Electron Microscopy of Clays. Ph.D. Thesis Cambridge University.

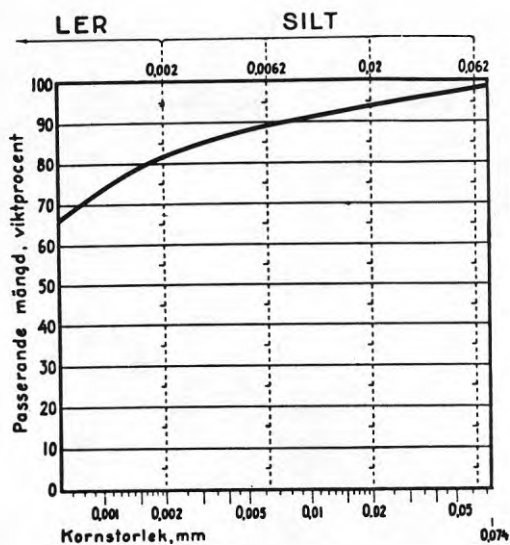
BILAGOR

Kornfördelningskurvor

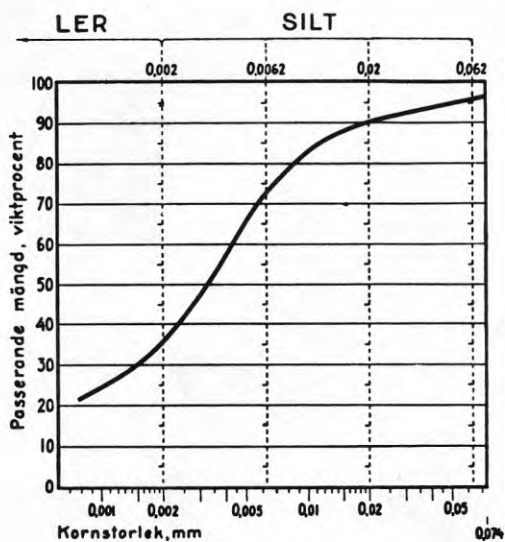
Ödometerdiagram

Elektronmikroskopbilder

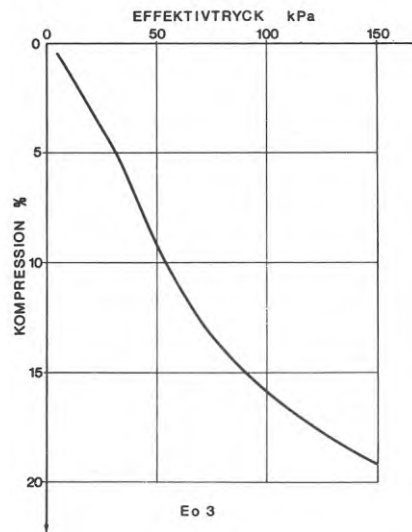
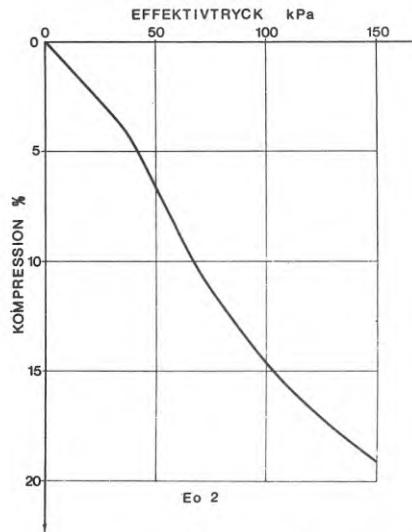
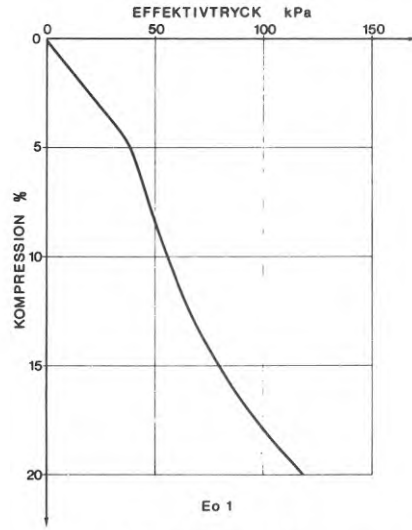


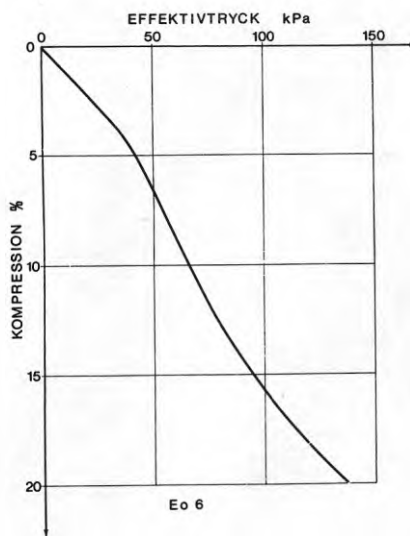
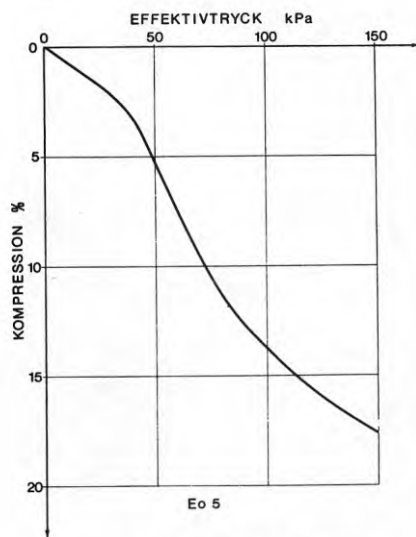
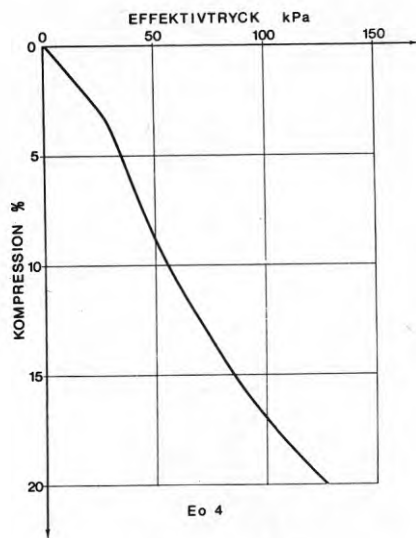


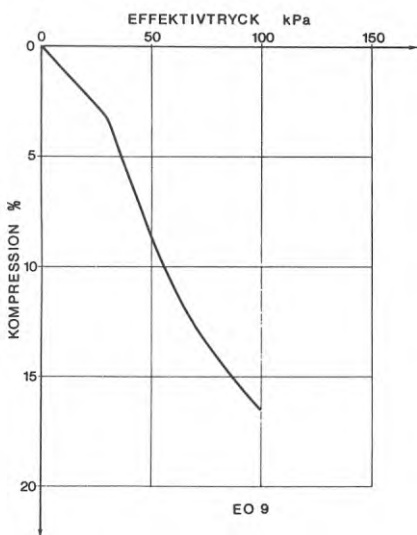
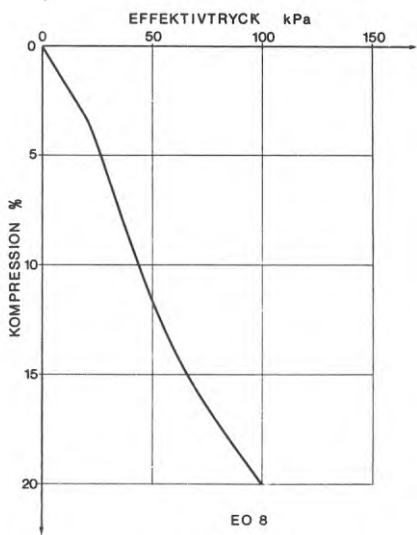
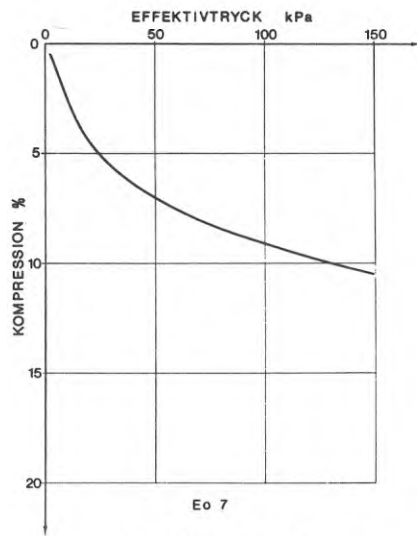
Eo 5

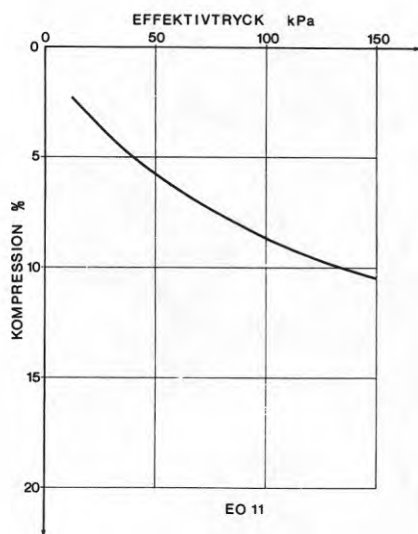
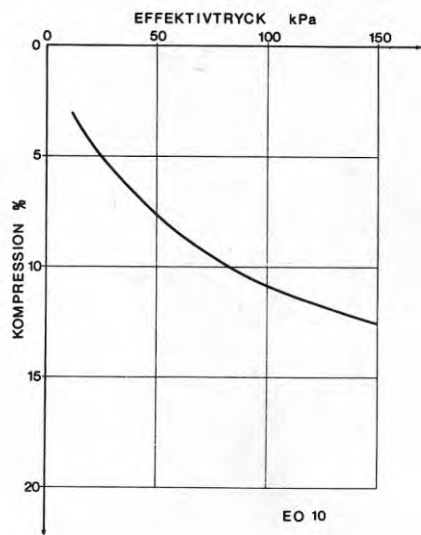


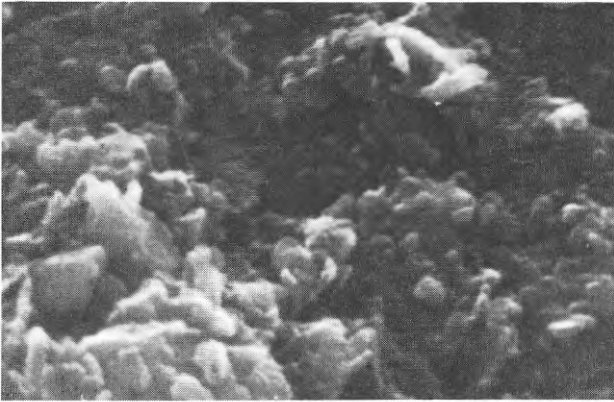
Eo 7, 10 och 11











Lufttorkat



Original



Anod



Mitt

Katod

Elektronmikroskopbilder av material Eo5 före och efter elektroosmos.

Förstoringsgrad 15.000 ggr.



Frystorkat

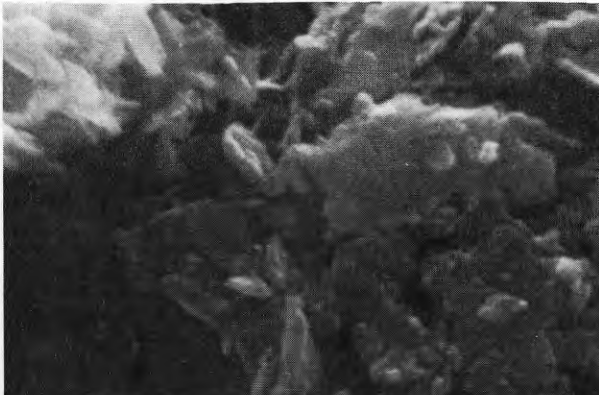
Original



Anod



Mitt



Katod

Elektronmikroskopbilder av
material Eo5 före och efter
elektroosmos.

Förstoringsgrad 15.000 ggr.

R45: 1975

Denna rapport hänför sig till forskningsanslag 730516-8 från Statens råd för byggnadsforskning till institutionen för geoteknik med grundläggning, Chalmers tekniska högskola, Göteborg.

Distribution: Svensk Byggtjänst, Box 1403, 111 84 Stockholm

Grupp: konstruktion

Pris: 22 kronor + moms