Die Anwendung der Elektrizität zur Entwässerung und Verbesserung feinkörniger Bodenarten

Autor(en): **Schaad, W. / Haefeli, R.**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin der Vereinigung Schweizerischer Petroleumgeologen und Petroleumingenieure**

Band (Jahr): **13 (1946)**

Heft 42

PDF erstellt am: **25.04.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-183057

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

Die Anwendung der Elektrizität zur Entwässerung und Verbesserung feinkörniger Bodenarten.

von W. Schaad und R. Haefeli.

Seit Mitte der Dreissigerjahre sind in der deutschen Literatur mehrere Veröffentlichungen erschienen, die die elektrische Bodenbehandlung zur Erzielung der Verfestigung und Entwässerung feinkörniger Bodenarten zum Gegenstand hatten (1-5)*. Dadurch wurde auch die Entwicklung des Erdbaues beeinflusst, der sich bis dahin bei der Anwendung praktischer Verfahren zur Behandlung von Bodenarten fast ausschliesslich auf mechanische Hilfsmittel und Methoden stützte. Die Einführung der Elektrizität in dieses Gebiet bringt völlig neue Gesichtspunkte, indem die zusätzliche physikalische Grösse mit den mechanischen Grössen in Wechselwirkung tritt. Parallel dazu muss ferner der Chemismus der Bodenarten berücksichtigt werden, da mit der Einwirkung elektrischer Gleichströme auch chemische Rückwirkungen verbunden sind. Die damit geschaffene Erweiterung, die in der Verbindung von Mechanik, Elektrizität und Chemie besteht, wirft entsprechend ausgedehnte Fragenkomplexe auf, deren Tragweite heute noch nicht klar abzuschätzen ist.

Ein erstes Anwendungsgebiet elektrischer Gleichströme zur Beeinflussung von Bodenarten bildete der Versuch, die in den bindigen Böden befindlichen, leicht gebundenen Ionen des Natriums und des Kaliums mittelst elektrolytischer Umsetzung durch fester gebundene zu ersetzen z.B. durch Aluminium-Ionen, womit gleichzeitig eine mechanische Verfestigung der Lockergesteinsmassen angestrebt und ihre Tragfähigkeit zu verbessern gesucht wurde (1-4).

Ein weiteres Anwendungsfeld elektrischer Gleichströme besteht darin, die Sickerströmung in feinkörnigen

---

* Die in Klammern angegebenen Zahlen beziehen sich auf das am Schlusse aufgeführte Literaturverzeichnis.

Bodenmassen nach dem Prinzip der Elektroosmose zu beschleunigen, um damit eine raschere Entwässerung als bei der normalen Grundwasserabsenkung zu erzielen (5). Da diese Methode gerade diejenigen Böden zu entwässern imstande ist, die sonst nur sehr schwer drainiert werden können, ist sie von besonderer Bedeutung für die Erdbaumechanik. Interessant ist ferner die Umkehrung des Prozesses, d.h. die Möglichkeit, die Elektroosmose zur Aktivierung der Infiltration von Injektionsmitteln in feinkörnige Massen zu verwenden. Im Gegensatz dazu bleibt die Injektion feinkörniger Lockergesteine mit den bisherigen mechanischen Hilfsmitteln, bei denen nur hydraulische Drücke verwendet werden, nicht nur in der Reichweite eng begrenzt, sondern auch auf relativ grobporige Massen beschränkt.

Die Frage der Entwässerung feinkörniger Bodenarten und die damit verbundenen Schwierigkeiten, sowie die bereits in Deutschland durchgeführten praktischen Versuche, diese Schwierigkeiten durch Anwendung elektrischer Gleichströme zu überbrücken, veranlassten die Erdbauabteilung der Versuchsanstalt für Wasserbau und Erdbau, sich diesen Problemen eingehender zu widmen. Der allgemeineren Bedeutung wegen, die der Lösung solcher Fragen zukommt, wurden die Forschungen in verdankenswerter Weise von der Eidg. Stiftung zur Förderung der Schweizerischen Volkswirtschaft unterstützt.

Das für die Bearbeitung dieses Gebietes im Jahre 1943 aufgestellte Untersuchungsprogramm berücksichtigte in erster Linie die "Elektroentwässerung". Es sah vor, ausgehend von elementaren Versuchen an Kapillaren, die in der Elektrokinetik bereits bekannten wissenschaftlichen Grundlagen mit Rücksicht auf die Entwässerung feinkörniger Bodenarten zu verarbeiten, um darauf gestützt, Theorie und Anwendung der Elektroentwässerung aufzubauen.

In Zusammenarbeit mit dem "Braunkohlenwerk Zell" und der "Swissboring" Zürich, die dieser Frage lebhaftes Interesse entgegenbrachten, wurde die Durchführung aufschlussreicher Feldversuche in einem speziell geeigneten Schlammsandgebiet ermöglicht.

Das Prinzip der Elektroentwässerung ist in Abb. 1 anhand eines Filterbrunnens dargestellt. Im letzten wird eine Elektrode z.B. ein Gasrohr oder Filterrohr angeordnet, in einiger Entferung eine zweite Elektrode (evt. mehrere) in den Boden eingeführt und die beiden mit den Polen einer Gleichstromquelle verbunden. Der durch die wassergefüllten Poren fliessende Strom bewirkt nun bei genügender Feinheit des Bodenmaterials das Phänomen der Elektroosmose, d.h. das Wasser wird durch den elektrischen Strom beschleunigt und dadurch in vermehrtem Mass zum Filterbrunnen transportiert. Die Ergiebigkeit des Brunnens kann auf diese Weise wesentlich gesteigert werden.

Die physikalische Erscheinung der Elektroosmose beruht auf der Berührungselektrizität zweier aneinander grenzender Medien. Bekanntlich entsteht an der Berührungsfläche zweier verschiedener Stoffe eine elektrische Spannungsdifferenz, wobei sich der Stoff mit höherer Dielektrizitätskonstanten gegenüber dem andern positiv auflädt. Dieses Phänomen tritt nun auch bei der Berührung von Wasser mit dem Bodenmaterial auf und ist in Abb. 2 an einer Kapillaren dargestellt. An der Grenzfläche von Flüssigkeit und Kapillarenwandung findet durch elektrostatische Kräfte eine Anziehung der an der sog. Grenzschicht befindlichen Elektronen der beiden Materialien statt, wobei die vorerwähnte Spannungsdifferenz entsteht. Diese wird als elektrokinetisches Teilchenpotential bezeichnet. Die Grenzschicht wirkt dabei wie ein Kondensator, der eine doppelte Belegung von elektrischen Ladungen trägt. Wird nun an die Enden der Kapillaren mittels Elektroden eine elektrische Spannung angelegt, so werden die geladenen Flüssigkeitsteilchen unter dem Einfluss der elektrischen Feldkräfte bewegt. Wasserteilchen werden z.B. meistens von der positiven zur negativen Elektrode getrieben, da sich Wasser dank seiner hohen Dielektrizitätskonstanten in der Regel positiv gegenüber andern Stoffen auflädt. In analoger Weise tritt dieser Bewegungsvorgang bei kommunizierenden Kapillarsystemen, also auch bei Lockergesteinen auf und kann deshalb zur Elektroentwässerung oder allgemein zum Transport von Flüssigkeit durch feinkörnige, poröse Massen verwendet werden. In techni-

scher Hinsicht lässt sich dabei an mannigfache Anwendungsgebiete denken, wie Entwässerung, Injektion, Imprägnierungen, Beschleunigung von Setzungen durch Wasserentzug etc.

Das Phänomen der Elektroosmose ist in der physikalischen Chemie schon lange bekannt. Es wurde im Jahre 1807 von Reuss entdeckt (6). Anschliessend folgten sehr intensive Untersuchungen der physikalischen Chemie, die diesem im 19. Jahrhundert Aufsehen erregenden Phänomen längere Zeit ihre rege Aufmerksamkeit schenkte. Helmholtz (7) war der erste, der mit dem Versuch dessen mathematischer Erfassung die prinzipielle Formulierung dazu aufstellte, welche später von Smoluchowski (8) verbessert und erweitert wurde. Diese Theorien wurden seither übernommen, ohne jedoch näher darauf einzugehen. Sie verloren im Rahmen der allgemeinen Physik bis zum heutigen Stand eher wieder an Interesse, so dass die Elektroosmose zu keiner wesentlichen Weiterentwicklung mehr gekommen ist. Als Anwendungsgebiete waren und sind namentlich die Chemie und in steigendem Masse auch die Medizin, insbesondere die physikalische Therapie, vertreten. Die erste verwendet das Phänomen und dessen verwandte Erscheinung, die Elektrokataphorese, namentlich zur Trennung vermischter Phasen. Es bestehen hier zahlreiche Patente, unter andern eines zur Trocknung von Torf, Sie gehören zu einem Grossteil den eigens für die Entwicklung dieser Verfahren gebildeten Unternehmen, wie der von Graf Schwerin gegründeten Elektroosmose A.-G. und der Siemens Elektroosmose G.m.b.H. (9). Die Medizin wendet derartige Verfahren insbesondere zur Einführung von Medikamenten in die feinen Gewebe des menschlichen Körpers, z.B. zur Rheuma- und Ischiasbehandlung oder für Wurzelbehandlungen der Zähne an.

Die von Helmholtz bezw. Smoluchowski abgeleitete Beziehung für die in einer nicht leitenden Kapillaren, unter hydraulischem Druck stehende und elektroosmotisch aktivierte Flüssigkeit lautet (8):

$$u = \frac{d^2}{32\eta} \cdot \frac{p}{l} + \left\{ \cdot \frac{\varrho_F \cdot D}{4\pi\eta} \cdot j \right.$$

worin bedeuten:

v = Mittlere Geschwindigkeit der transportierten Flüssigkeit
d = Durchmesser der Kapillaren
η = Zähigkeit der Flüssigkeit
p = an der Kapillaren wirkende Druckdifferenz
l = Länge der Kapillaren
ζ = Elektrokinetisches Teilchenpotential
ϱ_F = spezifischer Widerstand der Flüssigkeit
D = Dielektrizitätskonstante der Flüssigkeit
j = elektrische Stromdichte in der Kapillaren.

Man erkennt leicht, dass der erste Teil dieser Gleichung den von Poiseuille gefundenen Ausdruck für die Laminarstörung in einer unter dem Ueberdruck p stehenden Kapillaren darstellt, während der zweite Teil den elektroosmotisch bewirkten Geschwindigkeitsanteil bedeutet. Die Gleichung gilt mit einigen Modifikationen prinzipiell auch für poröse Massen, somit auch für Lockergesteine. Gestützt auf sie wurde im Verlauf der Untersuchungen der Erdbauabteilung unter Analogie zum Filtergesetz von Darcy (10), das bei Lockergesteinen anstelle der Gleichung von Poiseuille verwendet wird, eine Gleichung der elektroosmotisch beschleunigten Filtergeschwindigkeit aufgestellt. Sie besitzen einen ähnlichen Aufbau wie die von Helmholtz-Smoluchowski abgeleitete, wurde aber für erdbaumechanische Zwecke einfacher gestaltet.

Darnach ergibt sich diese Filtergeschwindigkeit zu

$$v_F = k \cdot J + k_E \cdot \xi \quad \text{bzw.} \quad v_F = K \cdot J + K_E \cdot \varrho \cdot j$$

Darin bedeutet:

v_F = Filtergeschwindigkeit
k = Durchlässigkeitsziffer (nach Darcy)
J = Gefälle der hydraulischen Drucklinie
k_E = elektroosmotische Durchflussziffer
ξ = elektrische Feldstärke
ϱ = spezifischer Widerstand des gesättigten Bodenmaterials
j = Stromdichte im Boden.

Anhand dieses Gesetzes, nach dem die Filtergeschwindigkeit einerseits dem hydraulischen Gefälle und anderseits der elektrischen Feldstärke direkt proportional ist, können die Durchflussverhältnisse der elektroosmotisch aktivierten Grundwasserströmung berechnet werden. Es kommt darin eine neue erdbaumechanische Kennziffer, die elektroosmotische Durchflussziffer k_E vor, die eine in ihrem physikalischen Aufbau sehr komplizierte Grösse ist. Sie besitzt die Dimension $\frac{cm/sec}{Volt/cm}$ und bedeutet die unter der Feldstärke 1 Volt/cm auftretende Filtergeschwindigkeit, wobei das hydraulische Druckliniengefälle J = 0 ist. Sie hängt von der Dielektrizitätskonstanten des Grundwassers, den spezifischen Widerständen des Festmaterials und des Grundwassers, der Porosität, dem Verhältnis des galvanischen Stromes (welcher als Parallelerscheinung die Elektrolyse erzeugt) zum elektroosmotischen Strom und von der Zähigkeit, bezw. Temperatur des Wassers ab. Sie kann aber mittels Feld- oder Laboratoriumsversuchen ähnlich wie die Durchlässigkeitsziffer k für einen bestimmten Boden ermittelt werden, ohne auf die speziellen vorerwähnten Eigenschaften eingehen zu müssen. Hiefür wurden an der Erdbauabteilung spezielle Apparaturen entwickelt, mit denen die begonnenen Versuchsarbeiten fortgesetzt werden. Als Beispiel mag angeführt werden, dass bei einem untersuchten Schlammsand, dessen Durchlässigkeitsziffer $k \sim 10^{-7}$ cm/sec betrug, eine elektroosmotische Durchflussziffer von $k_E \sim 9 \cdot 10^{-6} \frac{cm/sec}{Volt/cm}$ bestimmt wurde, was bedeutet, dass bei einer Feldstärke von 1 Volt/cm eine ca. 90 mal grössere Filtergeschwindigkeit in diesem Boden entsteht, als unter dem hydraulischen Druckliniengefälle 1 ohne Stromeinfluss. Das Gefälle 1 tritt ungefähr bei der lotrechten Versickerung von Wasser in Böden mit tief liegendem Grundwasserspiegel auf. Feldversuche mit Filterbrunnen haben anderseits gezeigt, dass bei geeigneten Böden mit geringen elektrischen Leistungen von ca. 100 Watt Beschleunigungen des Grundwassers stattfinden, die zu einem mehrfachen Betrag der ohne Stromeinfluss geförderten Wassermenge führen. Daraus ist ersichtlich, dass die Anwendung solcher Verfahren auch wirtschaftliche Vorteile bieten dürfte.

In diesem Zusammenhang sei auch noch auf die für die Geologie und Baugrundforschung ebenfalls interessanten Erscheinungen hingewiesen, die eng mit der Elektroosmose verwandt sind, mit der sie allgemein unter dem Begriff "Elektrokinetische Erscheinungen" zusammengefasst werden. Dies ist einerseits die Kataphorese, die dadurch in Erscheinung tritt, dass durch ein elektrisches Feld in Flüssigkeit suspendierte Teilchen bewegt werden können, und die in der physikalischen Chemie vielfach zur Trennung vermischter Phasen verwendet wird. Anderseits sind die den vorerwähnten Erscheinungen inversen Phänomene der Strömungsströme für die Geologie von besonderem Interesse. Durch das Fliessen von Flüssigkeiten, bezw. Wasser, durch feine poröse Diaphragmen, als welche auch feinkörnige Lockergesteine gelten können, entstehen elektrische Ströme und damit auch elektrische Felder, welche sich versuchstechnisch nachweisen lassen. Auch bei der Bewegung von suspendierten Teilchen entstehen derartige Strömungsströme. Diese Analogien der Elektroosmose und Kataphorese wurden schon früher von der physikalischen Chemie erkannt, untersucht und bestätigt. Smoluchowski stellte für die an den Enden einer Kapillaren auftretenden Potentialdifferenz U, welche durch den sich unter dem hydraulischen Druck einstellenden Durchfluss einstellt, die Beziehung auf (8):

$$U = \zeta \cdot \frac{\varrho_F \cdot D}{4\pi\eta} \cdot p$$

worin die einzelnen Grössen die früher erwähnten Bedeutungen besitzen. Bezieht man die obige Gleichung auf das Längendifferential, so erhält man

$$\xi = -\frac{dU}{ds} = -\zeta \cdot \frac{\varrho_F \cdot D}{4\pi\eta} \cdot \frac{dp}{ds}$$

Die elektrische Feldstärke ξ wird demnach proportional dem Druckgefälle $\frac{dp}{ds}$. Ueberträgt man nun diese Beziehung auf die als poröse Diaphragmen wirkenden Lockergesteine, so bleibt die erwähnte qualitative Abhängigkeit zwischen elektrischer Feldstärke und Druckgefälle erhalten. Somit ist es sicher, dass beim Durchfliessen feinkörniger

Massen durch den Transport der infolge der Berührungselektrizität entstehenden Ladungskonzentrationen elektrische Ströme, Potentialdifferenzen, wie auch elektrische Felder entstehen müssen. Dies führt uns zum umstrittenen Wünschelrutenproblem, dessen Ursachen immer noch im Unklaren liegen und die Forschung vor ungelöste Fragen stellen. Bekanntlich wurden auf Grund der schlechten Erfahrungen der Degebo mit Wünschelrutengängern im Jahre 1944 (11) in Deutschland die Rutengängerei für bauliche Zwecke der öffentlichen Verwaltungen verboten, dabei aber ausdrücklich bemerkt, dass die wissenschaftliche Erforschung dieses Gebietes dadurch nicht behindert werden solle. Auch existieren für die Auffindung von Quellen und Oelvorkommen besondere Instrumente, sog. Wasser- und Oelsucher, deren Wirkungsweise äusserst fraglich ist. Es ist aber auf Grund der wissenschaftlichen Ergebnisse trotzdem denkbar, dass durch die erwähnten Strömungsströme elektrische Felder entstehen, auf die zwar der empfindliche Mensch reagiert, die aber bis jetzt noch nicht mit physikalischen Messinstrumenten nachgewiesen werden konnten und vielleicht überhaupt nicht auf diesem Wege erfassbar sind. Es scheint doch die menschliche Empfindungsfähigkeit von ganz besonderer Art zu sein. Man denke nur an die Einflüsse des Föhns und der Witterungsumschläge, deren physiologische Wirkungen unverkennbar, die physikalischen dagegen immer noch sehr wenig abgeklärt sind. Es wäre demnach nicht ausgeschlossen, dass durch Strömungsströme bewirkte elektrische Felder und Feldänderungen den Empfindungsbereich sensibler Menschen tangieren.

Aus der Tatsache der an feinkörnige poröse Massen gebundenen Strömungsströme liessen sich auch verschiedene Eigenarten der Wünschelrutenreflexe erklären. Z.B. treten diese bei offen oder in Leitungen fliessendem Wasser u.W. nicht auf. Ebenso können hier aber auch keine intensiven Strömungsströme entstehen, da die bespülte Leitungsoberfläche im Verhältnis zur durchfliessenden Wassermenge sehr klein ist und damit auch nur ein geringer Ladungstransport stattfindet. Hingegen werden bei der Filtration durch poröse Massen sehr viele Berührungsstellen geschaffen, bei denen sich die elektrischen Ladungen kon-

zentriert ansammeln und durch die Wasserbewegung fortgeführt werden. Damit tritt ein verhältnismässig grosser Ladungstransport bezw. elektrischer Strom in Erscheinung und auch ein entsprechend grosses elektrisches Feld.

Die zweite Feststellung, dass Wünschelrutenreize hauptsächlich in der Nähe von Quellen und Wasseradern zu verspüren seien, wäre ebenfalls anhand der Existenz von Strömungsströmen zu erklären. In der Uebergangszone von der laminaren Sickerströmung zu Quellen oder Wasseradern steigt normalerweise das hydraulische Gefälle auf einen Höchstwert an, die Drucklinie fällt hier am steilsten ab. Damit müssten aber auf Grund der früher erwähnten Formel von Smoluchowski die Strömungsströme bezw. die Strömungspotentiale an dieser Stelle einen Höchstwert erreichen und somit auch die von ihnen bewirkte elektrische Feldintensität. Die Erscheinung der grössten Reize in dieser Zone wäre demnach ebenfalls anhand der Existenz der Strömungsströme physikalisch begründbar. Mit diesen Hinweisen soll jedoch nicht der zum Teil unverantwortlich betriebenen Wünschelrutengängerei das Wort geredet werden, sondern es soll lediglich angeregt werden, derartige Erscheinungen unvoreingenommen auf wissenschaftlichen Grundlagen zu prüfen. Im übrigen ist darauf hinzuweisen, dass auch bei der Berührung verschiedener Mineralvorkommen in Gegenwart von Wasser durch die natürlichen Potentialdifferenzen der Berührungselektrizität und damit verbundener Ströme elektrische Felder erzeugt werden können, aus denen nicht ohne weiteres auf ein bestimmtes Merkmal wie Wasseradern, Quellen etc. geschlossen werden kann.

Schon die wenigen hier dargestellten Anwendungsmöglichkeiten zeigen, dass für die elektrokinetischen Erscheinungen sehr weite Forschungsgebiete geologischer, geophysikalischer und erdbaumechanischer Natur brach liegen, deren Klärung sowohl vom Standpunkt der Wissenschaft wie der Praxis von Interesse sein dürfte. Die vorliegende Betrachtung behandelt diese Effekte vornehmlich mit Rücksicht auf die direkten Anwendungen der Elektroosmose. Ergänzend sei darauf hingewiesen, dass bei den oft angewandten geoelektrischen Messmethoden vorwiegend Gleichströme verwendet

werden. Dabei darf nicht übersehen werden, dass bei deren Einwirkung auf gesättigte, feinkörnige Lockergesteine ausser den bekannten Erscheinungen der Elektrolyse und der Polarisation auch elektrokinetische Rückwirkungen auftreten, die unter Umständen die geoelektrischen Messungen zu beeinflussen vermögen.

Zürich, den 18. Mai 1946.

Literaturverzeichnis.

(1) W. Bernatzik: Elektro-chemische Bodenverfestigung, Schlussbericht über den 2. Kongress der Internationalen Vereinigung für Brückenbau und Hochbau, Berlin-München 1. - 11. Oktober 1936, W. Ernst & Sohn, Berlin 1938.

(2) L. Erlenbach: Anwendung der elektrochemischen Verfestigung auf schwimmende Pfahlgründungen, Bautechnik 1936.

(3) L. Casagrande: Grossversuche zur Erhöhung der Tragfähigkeit von schwebenden Pfahlgründungen durch elektrochemische Behandlung, Bautechnik 1937.

(4) L. Casagrande: Die elektrochemische Bodenverfestigung, Bautechnik 1939.

(5) L. Casagrande: Zur Frage der Entwässerung feinkörniger Bodenarten, Deutsche Wasserwirtschaft 1941.

(6) Reuss: Sur un nouvel effet de l'électricité galvanique. Moscou, Soc. Nat. Mém. II, 1809.

(7) H. Helmholtz: Studien über elektrische Grenzschich

ten, Wiedemanns Annalen der Physik und Chemie, Leipzig 1879.

(8) M.v. Smoluchowski: Elektrische Endosmose und Strömungsströme, in Graetz's Handbuch der Elektrizität und des Magnetismus, J.A. Barth, Leipzig 1912.

(9) P.H. Prausnitz und J. Reitstötter: Elektrophorese, Elektroosmose, Elektrodialyse, Steinkopff, Dresden 1931.

(10) R. Dachler: Grundwasserströmung, Springer, Wien 1936.

(11) W. Dienemann
R. Hoffmann
J. Mauz
Baugrunduntersuchung mit der Wüschelrute, Bautechnik 1944.

Abb. 1. Schema eines elektroosmotisch betriebenen Filterbrunnes

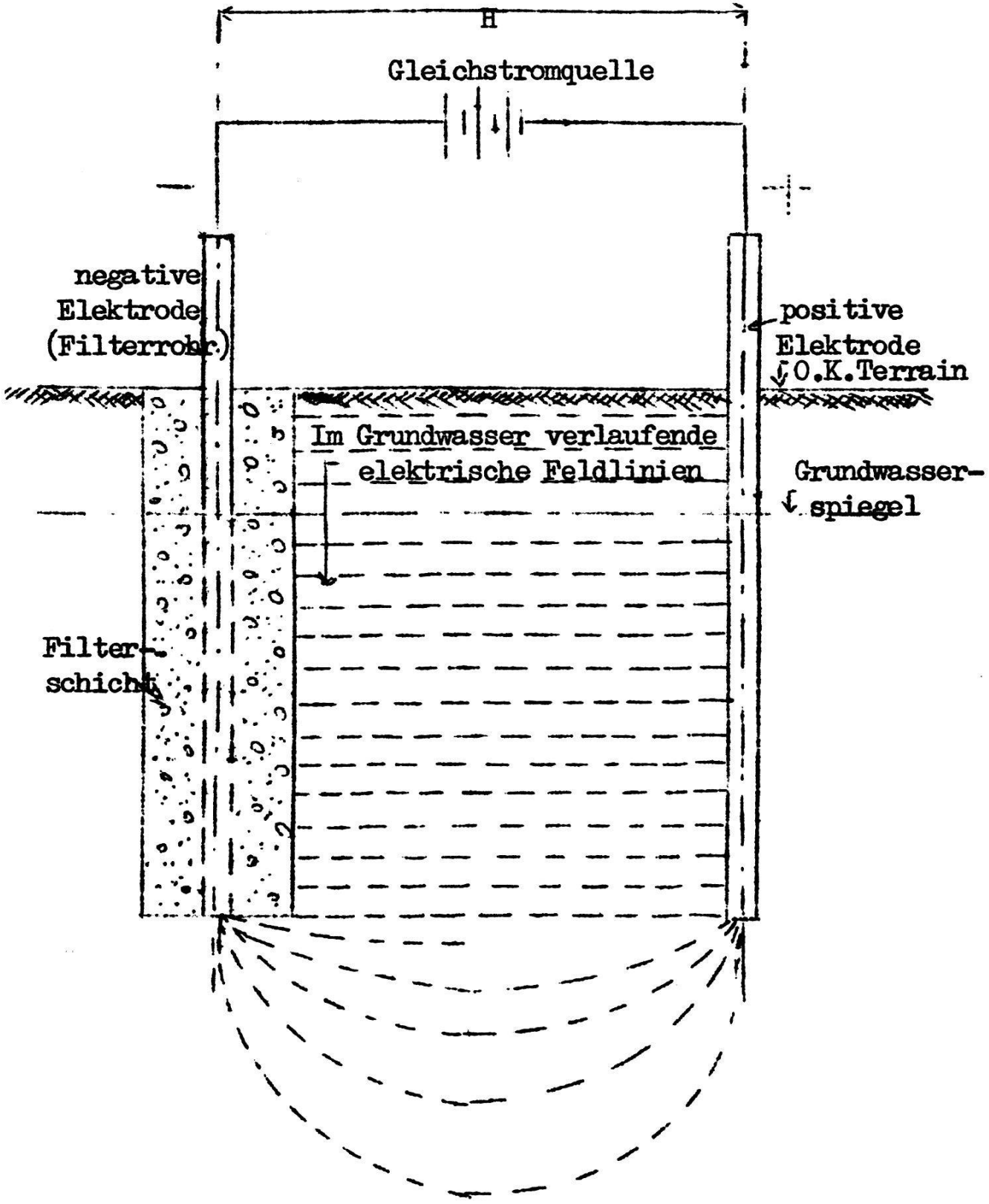
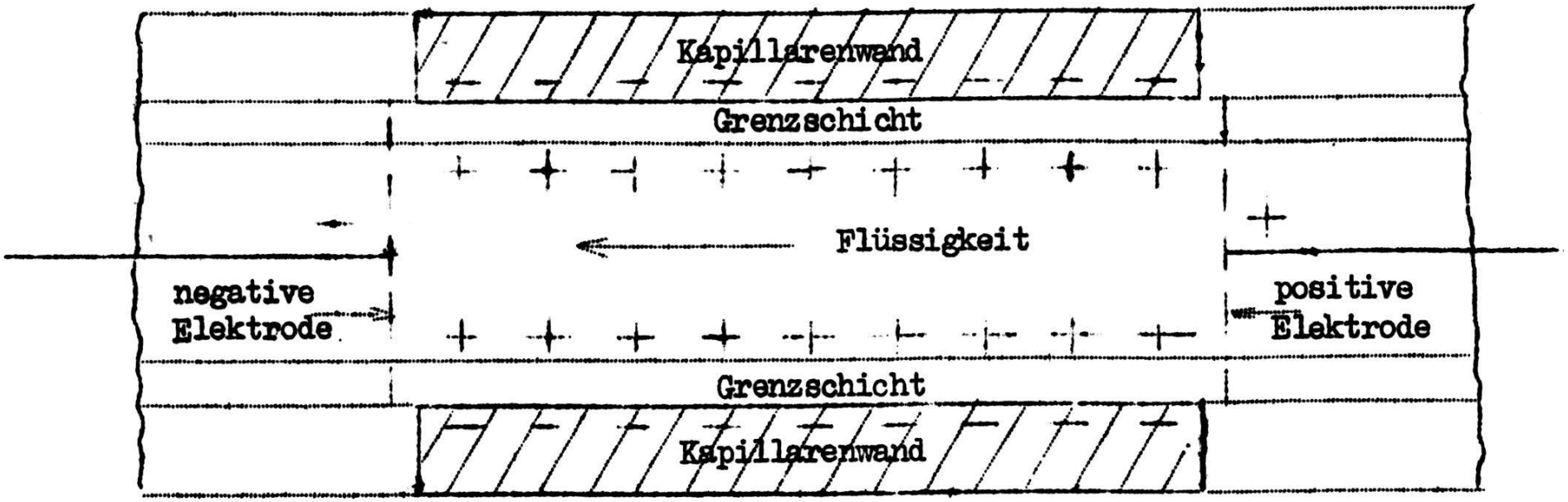
Abb. 2. Entstehung des Potentialsprunges und der Flüssigkeitswanderung in einer Kapillaren.