



Doctoral Thesis

## Elektrische Bodenstabilisierung

**Author(s):**

Jaecklin, Felix Paul

**Publication Date:**

1968

**Permanent Link:**

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-000097825> →

**Rights / License:**

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#) →

This page was generated automatically upon download from the [ETH Zurich Research Collection](#). For more information please consult the [Terms of use](#).

**Diss. Nr. 4190**

# **Elektrische Bodenstabilisierung**

**Abhandlung**

**zur Erlangung der Würde eines  
Doktors der technischen Wissenschaften**

**der**

**EIDGENÖSSISCHEN TECHNISCHEN HOCHSCHULE  
ZUERICH**

**vorgelegt von**

**FELIX PAUL JAECKLIN**

**dipl. Bauingenieur ETH**

**geboren am 28. August 1935**

**von Baden**

**Angenommen auf Antrag von**

**Prof. G. Schnitter, Referent**

**Prof. Dr. F. Balduzzi, Korreferent**

**1968**

**Bamberg**

**aku Fotodruck**

## I. ALLGEMEINER TEIL : EINLEITUNG

### 1. EINFUEHRUNG UND KURZFASSUNG DER VORLIEGENDEN ARBEIT

---

#### 1.1. Problemstellung

Ursache zu den vorliegenden grundsätzlichen Untersuchungen über die elektrische Bodenstabilisierung bot eine drohende Rutschung. Am Rande der Stadt Genf geriet, bei Crêts de Champell, ein Teil der abfallenden Böschung zum Fluss Arve in Bewegung. Die zugezogenen Experten ordneten den Aushub von Drainagegräben zur beschleunigten Konsolidation an, deren Wirkung durch ein Netz von Beobachtungspunkten kontrolliert wurde. Zufolge dieser Vorkehrungen und günstiger meteorologischer Bedingungen verlangsamte sich die Bewegung. Dank diesem Umstand konnten, statt in überstürzter Hast improvisieren zu müssen - wie dies bei Rutschungen leider meist der Fall ist - eingehende Untersuchungen durchgeführt werden. Der Aufwand wurde nicht zuletzt auch gerechtfertigt im Hinblick auf weitere latente Rutschgebiete in derselben Region, deren Stabilisierung früher oder später noch bevorsteht.

Die angeordneten Massnahmen bestätigen einmal mehr die bescheidenen bodenmechanischen Möglichkeiten zur Beruhigung eines Rutsches in undurchlässigem Material (Durchlässigkeit nach Darcy in der Grössenordnung von  $k = 10^{-8}$  cm/sec.)

Die üblichen Massnahmen zur Verbesserung der Hangstabilität beschränken sich in der Regel auf die Belastung des gefährdeten

Böschungsfusses oder allenfalls auf die Entlastung im Bereich des oberen Teils der Rutschung. Die Methode versagt bekanntlich dort, wo durch Materialentnahme oder Schüttung weitere sekundäre Rutschungen verursacht werden. Dauerhaft und wirksam sind systematisch angeordnete Drainagegräben, deren Ausführung in hinreichender Tiefe aber gerade in Rutschhängen kostspielig und gefährlich ist.

In vielen Fällen bildet die elektrische Bodenstabilisierung die einzige Behandlungsmöglichkeit wenig durchlässiger Böden. Das Verfahren bewährte sich während der vergangenen Jahrzehnte besonders bei schlechtem Untergrund in schwierigen, ausweglosen Situationen. Die Methode nur in Notfällen heranzuziehen mag vielfach auch in einer gewissen Zurückhaltung gegenüber elektrischen Einrichtungen und Chemikalien auf einer Erdbaustelle begründet sein. Obwohl das Verfahren sich nach Leo Casagrande 1\* 1962 ausnahmslos erfolgreich und auch als wirtschaftlich gegenüber anderen möglichen Massnahmen erwies, bleiben bis heute eine Reihe von Fragen unbeantwortet.

Folgende Fragen stellen sich vorgängig jeder Anwendung der elektrischen Bodenverfestigung:

1. Lässt sich das anstehende Material mittels elektrischer Stabilisierung behandeln ?
2. Um welchen Betrag kann die Scherfestigkeit gesteigert werden ?
3. Ist die Verfestigung dauerhaft oder nur durch die elektro-osmotische Entwässerung verursacht ?

Diese Problemstellung bildet den Ausgangspunkt der vorliegenden Arbeit über die Vorgänge bei der elektrischen Bodenstabilisierung.

---

\* siehe Literaturverzeichnis

## 1.2. Grundsätzliche Eignung und prinzipielle Versuchsergebnisse

---

Die Eignung zur elektro-osmotischen Stabilisierung kann für einige Böden vorausgesagt werden (L. Casagrande 1\* 1962). Dies gilt vor allem für durchnässten Silt mit wenig oder ohne Kohäsion. Den günstigen Kornverteilungsbereich für elektro-osmotische Entwässerung, hat L. Casagrande 2\* 1941 nach Steinfeld 3\* 1951 durch die Kornverteilungskurve charakterisiert. Die Böden der Rutschung in Genf liegen aber beträchtlich ausserhalb des günstigen Bereiches, sodass als erster Schritt ein Versuchsprogramm die prinzipielle Eignung dieser Bodenart abzuklären hatte. Die Versuche wurden vorwiegend an Seebodenlehm, d.h. grauer stark toniger Silt, folgender Charakteristik durchgeführt:

|                   |       |                         |           |                  |
|-------------------|-------|-------------------------|-----------|------------------|
| - Tonanteil       |       | 43 - 66 %               | < 2 $\mu$ |                  |
| - Fließgrenze     | $w_L$ | = 36 - 49 %             | }         | (nach Atterberg) |
| - Ausrollgrenze   | $w_P$ | = 17 - 20 %             |           |                  |
| - Plastizität     | $I_P$ | = 20 - 30 %             |           |                  |
| - Wassergehalt    | $w$   | = 25 - 34 %             |           |                  |
| - Durchlässigkeit | $k$   | = $10^{-8}$ - $10^{-9}$ | cm/sec.   |                  |

Die Versuche im Elektro-Oedometer nach Schaad und Haefeli 5\* 1947 hätten gestatten sollen, mittels den von Schaad und Haefeli 4\* 1946 gefundenen Formeln die elektro-osmotische Durchlässigkeit  $k_E$ , und die Durchlässigkeit nach Darcy  $k$ , sowie die aus dem Verhältnis der Durchlässigkeiten folgende elektrische Steighöhe  $h_E$ , zu errechnen.

$$h_E = k_E / k$$

Die Auswertung hätte eine Steighöhe von mehreren Metern erwarten lassen, während die effektiv gemessene kaum 20 cm betrug. Weitere Versuche zeigen ebenfalls, dass die klassische Theorie der Elektro-Osmose für tonige Böden kaum anzuwenden ist. Die Gleichungen nach

Helmholtz, resp. nach Schaad und Haefeli sind nicht für beliebige Böden allgemein anwendbar, sondern höchstens für gewisse stark siltige, nasse Böden mit relativ geringem Tonanteil zutreffend. Zudem sind diese Regeln auch dann nur für den Anfang gültig. Die Unterschiede zwischen der Voraussage der klassischen Theorie und den Resultaten der durchgeführten Versuche sind folgende:

1. Gemäss dem Ohm'schen Gesetz - dessen Gültigkeit die klassische Theorie der Elektro-Osmose, auch für Boden-Wasser-Systeme, voraussetzt - sollte die Stromstärke (Ampère) eine lineare Funktion der angesetzten Spannung (Volt) sein. Dies ist bei rascher Steigerung der Spannung durchaus der Fall, während bei langsamerer Steigerung dieser lineare Zusammenhang nicht mehr erfüllt wird.
2. Zeiteinfluss : Nach klassischer Auffassung bleibt bei konstanter, angelegter Spannung die Stromstärke konstant. Alle Versuche zeigen jedoch einen bedeutenden Stromabfall in Abhängigkeit von der Zeit.
3. Elektrische Durchlässigkeit : Die elektro-osmotische Durchlässigkeit  $k_E$  und die transportierte Wassermenge wird bei unveränderter Spannung als konstant angenommen. Aus den Versuchen geht jedoch übereinstimmend hervor, dass stets mit einer Abnahme zu rechnen ist, die vielfach gegen Null geht.
4. Konsolidation : Die Messungen der Setzung in Funktion der Zeit und der Auflast, mit und ohne gleichzeitigem elektro-osmotischem Stromeinfluss, ergeben im letzteren Falle eine Beschleunigung des Setzungsvorganges. Auch bei zeitlich begrenzter elektrischer Einwirkung kann ein in weiten Grenzen beliebiger Konsolidationsgrad erzielt werden.

Bei Bauwerken eröffnet dies Wege zur Beschleunigung von langanhaltenden Setzungen.

5. Die Scherfestigkeit hängt bekanntlich vom Wassergehalt und von der Vorgeschichte des Materiales ab. Die Liquiditätsindex-Scherfestigkeits-Abhängigkeit stellt für gestörte Böden eine charakterisierende Materialeigenschaft dar.

Durch die elektrische Einwirkung lässt sich einerseits der Wassergehalt eines Bodens vermindern und andererseits - darauf ist besonders hinzuweisen - mit der damit verbundenen elektro-chemischen Einwirkung die Liquiditätsindex-Scherfestigkeits-Abhängigkeit des Bodens verändern. Es kann eine Verschiebung der Konsistenzgrenzen nach Atterberg nachgewiesen werden.

Folgerungen :

Die Resultate dieser Versuchsserie ergaben als Konsequenz für die weiteren Untersuchungen:

1. Die klassische Theorie der Elektro-Osmose mit den üblichen Kennwerten der elektrischen Durchlässigkeit  $k_E$  und der Steighöhe  $h_E$  charakterisieren die elektro-osmotischen Eigenschaften des Bodens unvollständig.
2. Der Erfolg der elektrischen Bodenstabilisierung ist durch andere Parameter festzustellen. Insbesondere interessiert die Scherfestigkeits-Liquiditätsindex ( $I_L$ )-Abhängigkeit.

### 1.3. Ziele und Ergebnisse der daraus folgenden Untersuchungen

Die ersten Resultate haben mit aller Deutlichkeit aufgezeigt, dass auf der Grundlage der klassischen Elektro-Osmose-Theorie kein weiterer Fortschritt vorauszusehen war.

Im Hinblick auf die technische Anwendung konzentrierten sich die weiteren Untersuchungen darauf, ausser den physikalischen, auch den elektro-chemischen Vorgang und die damit verbundene Beeinflussung des Bodens zu studieren. Die Untersuchungen erfolgten durch Laborversuche und durch Veränderung einzelner Variabler.

Die Messung der Scherfestigkeit in Funktion der elektrischen Einwirkung und des Wassergehaltes erfolgte im Elektro-Konsolidationsgerät für grosse ungestörte Bodenproben mit dem Drehflügel. Eichversuche mit dem Drehflügelgerät gestatteten die rein durch Wassergehaltsveränderung verursachte Variation der Scherfestigkeit zu messen.

#### Phasen der elektro-osmotischen Entwässerung

Die Beobachtung des elektro-osmotischen Entwässerungsvorganges lässt drei Phasen erkennen :

1. Phase : Eine Anfangszeit mit gutem elektrischem Wassertransport, der dann stetig abnimmt.



2. Phase : Starke Rissebildung in der Umgebung der Anoden, dem ein grosser Stromabfall und geringerer Wassertransport folgt. Die Risse wirken als elektrische Isolatoren und beenden dadurch jede weitere Beeinflussung des Bodens. Eine Analyse zeigt, dass die Grenze der elektro-osmotischen Konsolidation mit Elektrodenstangen in erster Näherung eine Funktion der Ueberlagerungshöhe ist. Bei grosser Ueberlagerung lässt sich eine höhere Verfestigung erzielen als an der Oberfläche, wobei allerdings die durch die Schrumpfung verursachte Deformation in sensitiven Böden einen Strukturzusammenbruch verursachen kann mit der entsprechenden, dem Wasserentzug gegenläufigen Wirkung der Scherfestigkeitsverminderung.
3. Phase : Schlussphase mit geringem, fast gleichbleibendem Strom ohne sichtbare weitere Veränderungen.

Die theoretischen Untersuchungen ergeben - gepaart mit den durchgeführten Versuchen - ein Bild dieser Vorgänge, das sich vom bisherigen wie folgt unterscheidet:

Jede elektrische Bodenstabilisierung ist begleitet von elektro-chemischen Vorgängen, verursacht durch den Stromübergang von den Elektroden in den Boden. Es erscheinen Gasentwicklungen, Erwärmungen und vor allem Materialablagerungen in Elektrodennähe, die von starker verfestigender Wirkung, aber auch elektrisch isolierend sein können, und jede weitere Beeinflussung verunmöglichen.

Aus dieser Situation folgen die Hauptfragen der anschliessenden Versuchsetappe:

1. Aus welchen grundsätzlichen Erkenntnissen folgen:
  - Materialwahl und konstruktive Ausbildung der Elektroden und Zubehörteile ?
  - geometrische Anordnung von Anoden und Kathoden ?
  - anzulegende Spannung ?
2. Kann bei der Anode ein die Verfestigung begünstigender Elektrolyt eingegeben werden ?

Die Versuche mit Kupfer- oder Zinkanoden zeigen einen geringeren Stromabfall, wobei aber keine wesentliche Verfestigung eintritt. Wird durch eine geeignete Versuchsanordnung der Wassernachschub auf der Anodenseite im Sinne eines simulierten Grundwasserspiegels ergänzt, so zeigen die Versuche mit Eisen-, Kupfer- oder Zink-elektroden auch nach längerer elektro-osmotischer Behandlung keine Scherfestigkeitszunahme auf. Kupferdrahttressen als Elektroden lassen die Probe gut entwässern, sodass eine Verfestigung zufolge des geringeren Wassergehaltes eintritt.

Der Seebodenlehm von Crêts de Champell lässt sich durch Verwendung von Aluminiumanoden bleibend verfestigen, doch bleibt diese Verfestigung auf einen Bereich um die Kathoden beschränkt. Durch die Beeinflussung werden die Konsistenzgrenzen nach Atterberg verschoben, was einer chemischen Stabilisierung entspricht. Die Versuche zeigen je nach angelegter Spannung eine Zunahme der Festigkeit auf ein Vielfaches des Anfangswertes.

Durch geeignete Elektrolytzugaben bei der Anode kann zudem der Boden in bedeutend weiterem Umkreis beeinflusst werden.

Durch Zugabe konzentrierter, aggregierend wirkender Lösungen bei der Anode kann eine bemerkenswert gleichförmige Scherfestigkeitserhöhung

über den Grossteil des Bereiches zwischen den Elektroden erreicht werden. Die Verfestigung ist dann nicht so gross wie bei Verwendung von Aluminiumanoden, jedoch verbessern sich die Durchlässigkeitseigenschaften des stark tonigen Bodens. Der Nachteil der Ablösung des Bodens bei den Anoden durch Rissebildung mit dem entsprechenden Stromabfall entfällt, da der zugegebene Elektrolyt in die Risse fliesst. Gute Resultate wurden mit gesättigter Kalziumchloridlösung ( $\text{CaCl}_2$ ) erzielt.

Der elektro-osmotische Anteil der Verfestigung und der elektrochemische Stabilisierungseffekt werden getrennt. Die Scherfestigkeit in Abhängigkeit vom Wassergehalt auf die entsprechenden Anfangswerte bezogen, ergibt in halblogarithmischer Darstellung nahezu eine Gerade. Aus den Versuchsergebnissen zeigt sich:

1. Die Scherfestigkeit nimmt bei steigendem Konsolidationsdruck linear zu.
2. Die Scherfestigkeit nimmt mit der angelegten Spannung linear zu.
3. Die durchgeführten Versuche zeigen beim betrachteten Material, dass die gleiche Scherfestigkeit, die bei einem gewählten Konsolidationsdruck durch Entwässerung allein erreicht wird, bei elektrischer Stabilisierung durch Wahl der Spannung ebenfalls erreicht werden kann, wobei die benötigte Aenderung des Raumgewichtes geringer ist. Das Mass hängt vom Anfangszustand ab. Dies ist nur möglich weil dadurch die Materialeigenschaften verändert werden.

#### 1.4. Folgerungen zur elektrischen Stabilisierung im Feld mit einer neuartigen Elektrodenkonstruktion

Die Untersuchungen führen zum Vorschlag einer neuartigen Elektrodenkonstruktion. Die ungünstigen Einflüsse der Rissbildung und Ablösung der Elektroden können durch besondere Elektroden-Konstruktion (siehe Kapitel 6.1., Elektrodenkonstruktion) vermindert werden.

Der Vorteil der neuen Elektroden liegt darin, dass der Zwischenraum zwischen Metallrohr und Boden durch Graphit-sand dauernd erhalten bleibt.