

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins
Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke
Band: 25 (1934)
Heft: 15

Artikel: Untersuchungen über den Erdungswiderstand verschiedener Bodenarten und die Vorausberechnung der Elektroden
Autor: Sprecher, E.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1060162>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 03.04.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

SCHWEIZERISCHER ELEKTROTECHNISCHER VEREIN

BULLETIN

REDAKTION:

Generalsekretariat des Schweiz. Elektrotechn. Vereins und des Verbandes Schweiz. Elektrizitätswerke, Zürich 8, Seefeldstr. 301

VERLAG UND ADMINISTRATION:

A.-G. Fachschriften-Verlag & Buchdruckerei, Zürich 4
Stauffacherquai 36/40

Nachdruck von Text oder Figuren ist nur mit Zustimmung der Redaktion und nur mit Quellenangabe gestattet

XXV. Jahrgang

N^o 15

Mittwoch, 18. Juli 1934

Untersuchungen über den Erdungswiderstand verschiedener Bodenarten und die Vorausberechnung der Elektroden.

Von E. Sprecher, Elektrizitätswerke des Kantons Zürich.

621.316.993

Die Elektrizitätswerke des Kantons Zürich (EKZ) untersuchten theoretisch und experimentell die wirtschaftlich wichtige Frage, wie eine Erdungsanlage gebaut und dimensioniert werden muss, damit ihr Erdungswiderstand mit einiger Sicherheit einen bestimmten, z. B. durch die neuen bundesrätlichen Verordnungen über elektrische Anlagen vorgeschriebenen Wert nicht überschreitet. Ueber diese Untersuchungen, zu denen auch ein Geologe zugezogen wurde, wird im folgenden berichtet. Sie ergaben eine brauchbare Methode der Vorausberechnung von Erdungsanlagen; an einem Beispiel wird dies gezeigt.

Les Entreprises électriques du canton de Zurich (EKZ) ont examiné au point de vue théorique et expérimental la question importante de savoir comment dimensionner et établir une installation de mise à la terre pour qu'elle satisfasse aux conditions requises de la nouvelle ordonnance fédérale sur les installations électriques à fort courant, c'est-à-dire pour que la résistance de passage à la terre ne dépasse en aucun cas les valeurs maximums prescrites. Ces recherches, faites en collaboration avec un géologue, sont décrites dans l'article ci-dessous. Elles ont conduit à une méthode pratique permettant de calculer d'avance les installations de mise à la terre. Le calcul préconisé est illustré par un exemple pratique.

I.

Soll eine Erdung ihren Zweck als Schutzmassnahme gegen gefährliche Berührungsspannungen oder gegen Ueberspannungen erfüllen, so muss ihr Erdungswiderstand mit Rücksicht auf den in Betracht kommenden Erdschlußstrom bemessen worden sein. Aus diesem Grunde enthalten die neuen schweizerischen Verordnungen über elektrische Anlagen nicht nur Angaben über die Grösse der Erd Elektroden (nachfolgend kurz «Erder» genannt), sondern auch Bestimmungen über den höchstzulässigen Erdungswiderstand, oder, was das gleiche bedeutet, über den bei einem bestimmten Strom an der Erdung höchstzulässigen Spannungsabfall. Man steht also beim Bau einer Erdungsanlage vor der Aufgabe, zu einem gegebenen Erdungswiderstand den passenden Erder zu suchen.

Der Widerstand einer Erdung setzt sich zusammen aus dem Widerstand der metallischen Leiter (Erdleitung und Erder) und dem Widerstand des den Erder umgebenden Erdbodens. Der erste ist im Verhältnis zum zweiten im allgemeinen sehr klein und sei deshalb für die weitere Untersuchung ausser Betracht gelassen. Der Widerstand des den Erder umgebenden Erdbodens hängt ab von der Form und den Abmessungen des Erders, von seiner Anordnung im Erdboden und von der spezifischen Leitfähigkeit des Bodens. Für angenommene Verhältnisse lässt sich also der Erdungswiderstand eines Erders zum voraus berechnen. Nähere Angaben darüber finden sich in der ein-

schlägigen Literatur¹⁾. In der Praxis wird man aber doch bei der Vorausberechnung in vielen Fällen auf Schwierigkeiten stossen, weil die Leitfähigkeit bzw. der spezifische Widerstand des in Betracht kommenden Erdbodens nicht bekannt ist. Es wurden zwar über diesen Gegenstand schon früh Untersuchungen durchgeführt²⁾. Dabei ergab sich, dass der spezifische Widerstand nicht nur von der Bodenart, sondern auch von Wassergehalt, Temperatur und Druck des Bodens abhängt und sehr verschieden gross sein kann. Weil aber diese Verhältnisse im Erdboden, wo ein Erder zu verlegen ist, nicht bekannt sind, ist eine Uebertragung der so ermittelten Werte auf einen bestimmten Fall nicht möglich. In manchen Fällen kann sich der Betriebsleiter helfen, indem er die Grösse des zu verlegenden Erders in Anlehnung an einen in gleichartigem Erdboden verlegten Erder von bekannter Grösse und bekanntem Widerstand bemisst. Steht ihm kein solcher zur Verfügung, dann wird er es vielleicht auf Grund seiner Erfahrungen auf einen Versuch ankommen lassen. Das mag hingehen, solange es sich um wenige Erdungen handelt. Steht man aber vor der Aufgabe, z. B. in Erfüllung von Art. 27 der Verordnung über Starkstromanlagen, jährlich einige hundert Erdungen bei neuen Anlagen oder Revisionen auf den vorgeschriebenen Widerstandswert zu bringen, und bedenkt man, wieviel Umtriebe und Unkosten die

¹⁾ Z. B.: Ollendorf, Erdströme. Berlin, Jul. Springer, 1928.

²⁾ Ruppel, ETZ 1913, S. 1221.

Verbesserung ungenügender Erdungen verursacht, so sieht man ein, dass eine Vorausberechnung der Erdungen nötig ist. Die Ungleichheiten des Erdbodens werden zwar eine Uebereinstimmung zwischen dem berechneten und dem gemessenen Wert in Frage stellen. Unter gewissen Voraussetzungen ist es aber doch möglich, eine praktisch genügend grosse Annäherung der beiden Werte zu erreichen, und es soll im folgenden auf einen Weg hingewiesen werden, der in manchen Fällen zum Ziele führen kann.

Wird ein Erder von einfacher Form und bekannten Abmessungen in homogenes Erdreich verlegt, so lässt sich aus einer Widerstandsmessung der spezifische Widerstand des Erdbodens bestimmen. Daraus kann der Widerstand für einen am gleichen Ort zu verlegenden Erder von andern Abmessungen berechnet werden, ein Verfahren, das schon oft bei grösseren Erdungsanlagen gewählt wurde. Der Versuchserder braucht nicht gross zu sein. Ein Metallstab von 30 bis 50 cm Länge und 10 bis 30 mm Durchmesser genügt in vielen Fällen; meistens wird die Grösse durch den Messbereich des Instrumentes und durch die Beschaffenheit des Erdbodens bestimmt sein. Der so ermittelte spezifische Widerstand gilt für den Zeitpunkt, an dem die Messung ausgeführt wurde. Die Verordnung über elektrische Starkstromanlagen schreibt jedoch im allgemeinen vor (z. B. Art. 21, Ziffer 2, und Art. 23, Ziffer 2), dass der angegebene Erdungswiderstand unter allen zu erwartenden Verhältnissen nicht überschritten werden darf. Es handelt sich also noch darum, den Einfluss der Witterung auf den Widerstand zu ermitteln. Werden die Widerstandsmessungen an einer fest verlegten Versuchserdung in gewissen Zeitabständen wiederholt und werden dabei jeweils Temperatur und Niederschläge berücksichtigt, so ist dieser Einfluss erkennbar. Der grösste sich ergebende Wert des spezifischen Widerstandes ist der Berechnung eines Erders in dieser Bodenart zugrunde zu legen.

Es ist nun selbstverständlich undenkbar, in allen Bodenarten, die für die Verlegung von Erdungen in Frage kommen können, Versuchserdungen anzulegen. Man wird sich auf einige charakteristische Bodenarten beschränken müssen. Ein Ueberblick über die geologische Gestaltung eines Landes zeigt indessen, dass in manchen Fällen grössere Teile des Versorgungsgebietes eines Elektrizitätswerkes, und namentlich solche, wo Erdungen in grosser Zahl vorkommen, eine ähnliche Beschaffenheit des Erdbodens aufweisen; so besteht z. B. der Talgrund grosser Täler oft nur aus Kiesboden. Lässt man noch diejenigen Bodenarten, in denen nur wenige Erdungen zu verlegen sind, ausser Betracht, so kommt man mit relativ wenig Meßstellen aus. Durch geeignete Wahl des Ortes lassen sich die Unkosten für Erstellung und Bedienung gering halten.

Die periodischen Messungen an solchen Versuchserdungen dienen aber nicht nur zur Ermitt-

lung des spezifischen Widerstandes einer Bodenart, sondern sie geben, was viel wichtiger ist, Aufschluss über die Grösse der Schwankungen, hervorgerufen durch die Witterungseinflüsse. Messergebnisse, auf die später eingetreten wird, haben gezeigt, dass, gleiche klimatische und meteorologische Verhältnisse vorausgesetzt, die Schwankungen des spezifischen Widerstandes bei vielen Erdungen in annähernd gleicher Tiefe ungefähr im gleichen Rhythmus vor sich gehen. Die Höchstwerte treten erfahrungsgemäss in einem trockenen Sommer oder bei grosser Kälte auf, die tiefsten Werte nach langen Regenperioden. Ferner darf angenommen werden, dass die Grösse der Schwankungen, z. B. prozentual auf den Jahresmittelwert bezogen, bei Bodenarten von ähnlicher Zusammensetzung, z. B. bei lehmhaltigen Böden, ungefähr gleich gross sei. Man braucht also nur an einer einzigen Meßstelle die Messungen in kleinen Zeitabständen durchzuführen und bestimmt an den andern Erdungen die Widerstände nur dann, wenn die Grenzwerte und Mittelwerte auftreten. Sind diese ermittelt, so können alle Meßstellen mit Ausnahme der erwähnten wieder aufgehoben werden. Die Angaben dieser einen Meßstelle geben ständig ein Bild über die Grösse der Schwankungen der Widerstandswerte.

Die an den Meßstellen ermittelten Werte für den spezifischen Widerstand können nicht unmittelbar für die Berechnung von Erdungen an andern Orten verwertet werden, weil der Widerstand einer Bodenart durch geringfügige Unterschiede in der Zusammensetzung stark beeinflusst wird. Man wird in jedem Fall vor der Verlegung eines Erders mit einer Sonde den spezifischen Widerstand der betreffenden Bodenart in der vorgesehenen Tiefe bestimmen müssen. Ein Vergleich mit einer der untersuchten Bodenarten gibt Anhaltspunkte über die Grösse der Schwankungen der Widerstandswerte, die für diesen Boden zu erwarten sind, während die ständige Meßstelle Aufschluss gibt, wieviel ihr zu gleicher Zeit gemessener Widerstand vom Jahresmittelwert und Grenzwert abweicht. Aus einem Vergleich beider lässt sich für die in Frage kommende Bodenart der höchste zu erwartende spezifische Widerstandswert einigermaßen genau vorausbestimmen. Ein Beispiel hiezu ist später angegeben. Um die Notwendigkeit eines solchen Vorgehens darzulegen, sei vorweggenommen, dass sich der spezifische Widerstand der untersuchten Bodenarten unter dem Einfluss der Witterung im Verhältnis 1 : 1,5 bis 1 : 4 geändert hat. Es ist noch zu beachten, dass die Angaben der Meßstelle, wie erwähnt, nur für Gebiete mit annähernd gleichen Witterungsverhältnissen gelten. Sind diese im ganzen Versorgungsgebiet sehr stark verschieden, so lässt sich ihr Einfluss durch die Errichtung einer zweiten Meßstelle an einem geeigneten Ort ermitteln. Die Widerstandswerte der in einer Tiefe von mehr als 1 m verlegten Erdungen werden übrigens durch lokale Niederschläge, z. B. durch Gewitterregen, nur wenig beeinflusst. Aenderungen, die

über die Grösse der Messfehler hinausgehen, sind erst durch anhaltende Niederschläge zu erwarten.

II.

Die Elektrizitätswerke des Kantons Zürich haben vor einigen Jahren an einer grössern Zahl von Versuchserdungen während längerer Zeit Messungen durchgeführt; im folgenden soll einiges über die Messergebnisse mitgeteilt werden.

Die im Kanton Zürich für die Verlegung von Erdern hauptsächlich in Frage kommenden *Bodenarten* entstammen den Eiszeiten und der Molassezeit. Von den eiszeitlichen Ablagerungen waren die Moränen, die Kiesschotter und der Lehm zu berücksichtigen; von den Molasseablagerungen kamen in Frage Nagelfluh und Sandstein. Ferner wurde im Lägernkalkstein (Jura) die älteste und im Torf die jüngste geologische Ablagerung untersucht. Auf Anraten von Herrn Dr. Hug, Geologe, wurden an folgenden Orten Meßstellen eingerichtet:

Verzeichnis der Meßstellen. Tabelle I


No. der Meßstelle	Ortsübliche Bezeichnung	Geologische Bezeichnung	Standort
1	Steinige Erde (Niet)	Obermoräne der letzten Eiszeit	Thalwil i. Brand
2	Steinige Erde (Niet)	Grundmoräne	Affoltern a. A.
3	Kiesboden (wenig über Grundwasser)	Eiszeitlicher Schotter	Dietikon
4	Kiesboden (zeitweise im Grundwasser)	Eiszeitlicher Schotter	Dietikon
5	Kiesboden (hoch über Grundwasser)	Eiszeitlicher Schotter	Bahnhof Hüntwangen (Rafzerfeld)
6	Lehm	Seebodenlehm d. letzten Eiszeit	Oberglatt
7	Torf, Rietboden	Torf	Kempen-Wetzikon
8	Sandstein (Pickel- oder Leberfels)	Molasse-Sandstein der obern Süsswassermolasse	Rüti-Zürich
nachträglich wurden noch untersucht:			
9	Nagelfluh	Molasse-Nagelfluh	Hombrechtikon
10	Lägern-Kalkstein	Jura-Kalk	Regensberg

Als Erder wurden verzinkte Rohre von 0,5 m² Oberfläche eingegraben, und zwar für die Messstellen Nr. 1 bis Nr. 8 Rohre von 12,8 cm Durchmesser und 125 cm Länge, für die Meßstellen Nr. 9 und Nr. 10 Rohre von 8 cm Durchmesser und 2 m Länge. An jeder Meßstelle wurden drei Erder in einem gegenseitigen Abstand von ca. 20 m verlegt. Diese Anzahl war einerseits durch die Messmethode bedingt, weil an den meisten Orten die Widerstände mit Telephonmessbrücken nach der Methode von Nippold bestimmt werden mussten, wofür zwei Hilferder erforderlich sind. Andererseits war es auch

erwünscht, durch Messungen an zwei genau gleich verlegten Erdern den Einfluss von Ungleichheiten der gleichen Bodenart zu ermitteln. Ferner sollte durch eine andere Verlegungsart des dritten Rohres der Einfluss der Verlegungstiefe auf den Widerstand festgestellt werden. Bei der Festlegung der gegenseitigen Abstände wurde in Betracht gezogen, dass für Erder von solchen Abmessungen der Erdungswiderstand auf einige Prozente genau durch den Widerstand einer Halbkugel von 10 m Radius dargestellt wird, in deren Mittelpunkt der Erder liegt. Die Rohre von 125 cm Länge wurden senkrecht in den Boden eingegraben, und zwar an jeder Meßstelle zwei Rohre so, dass ihr oberes Ende 70 bis 90 cm unter der Erdoberfläche lag. Das obere Ende des dritten Rohres lag einige Zentimeter unter der Erdoberfläche. Die Rohre der Meßstellen Nr. 9 und Nr. 10 wurden in einer Tiefe von 50 bis 90 cm horizontal verlegt. In allen Fällen wurde die ausgehobene Erdöffnung vor dem Verlegen der Rohre besichtigt, die Lage der Erdschichten aufgenommen und das Erdreich genau den Schichten entsprechend wieder eingefüllt. Die Erder der Meßstellen Nr. 1 bis Nr. 8 wurden im Herbst 1928 verlegt. Die Messergebnisse beziehen sich auf die Jahre 1929 und 1930. An den Meßstellen Nr. 9 und Nr. 10 wurden die Messungen in den Jahren 1930 und 1931 durchgeführt. Der spezifische Widerstand des Erdbodens wurde aus folgenden Formeln³⁾ bestimmt:

Es bedeute *R* den gesuchten Widerstand in Ohm, *ρ* den spezifischen Widerstand, bezogen auf einen Querschnitt von 1 cm² und eine Länge von 1 cm, nachfolgend in Ohm · $\frac{\text{cm}^2}{\text{cm}}$ angegeben, *l* die Länge des Rohres oder Bandes in Zentimeter, *d* den Durchmesser des Rohres in Zentimeter und *t* die Eingrabetiefe bis Mitte Rohr oder Band in Zentimeter; dann gilt:


a) für das senkrecht im Boden nach Fig. 1a eingegrabene Rohr, wenn *l* viel grösser als $\frac{d}{2}$



$$R = \rho \cdot \frac{2,3 \lg \frac{4l}{d}}{2 \pi l}$$

Fig. 1a.

b) für das senkrecht im Boden nach Fig. 1b eingegrabene Rohr, wenn *l* viel grösser als *d* und *t* viel grösser als $\frac{l}{4}$



$$R = \rho \cdot \frac{2,3 \lg \frac{2l}{d} + \frac{2,3}{2} \lg \frac{2t + \frac{l}{2}}{2t - \frac{l}{2}}}{2 \pi l}$$

Fig. 1b.

c) für das wagrecht im Boden liegende Rohr oder gestreckte Band nach Fig. 1c, wobei für Flachband von der Breite *b* zu setzen ist $d = \frac{b}{2}$



Fig. 1c.

³⁾ Ollendorff, loc. cit.

1. wenn l viel grösser als d und t viel kleiner als $\frac{l}{4}$

$$R = \rho \cdot \frac{2,3 \lg \frac{2l}{d}}{2 \pi l} \cdot \left(1 + \frac{\lg \frac{l}{2t}}{\lg \frac{2l}{d}} \right)$$

2. wenn l viel grösser als d und t viel grösser als $\frac{l}{4}$

$$R = \rho \cdot \frac{2,3 \lg \frac{2l}{d}}{2 \pi l} \cdot \left(1 + \frac{l}{4t} \cdot \frac{1}{2,3^2 \cdot \lg^2 \frac{l}{d}} \right)$$

Die Messungen wurden in Abständen von ungefähr zwei Wochen durchgeführt. Die Messgenauigkeit war Gegenstand einer besondern Untersuchung. Die Fehler liessen sich nicht beliebig klein halten; sie sind zum Teil in der Messmethode und in der Anordnung der Erder begründet und können bis 10 % betragen.

In Fig. 2 ist das *Resultat der Messungen* zusammengefasst. Die spezifischen Widerstände der untersuchten Bodenarten sind in $\text{Ohm} \cdot \frac{\text{cm}^2}{\text{cm}}$ aufgetragen,

und zwar sind jeweils der niedrigste und der höchste Wert und der Mittelwert aus ca. 50 Messungen an den beiden in einer mittleren Tiefe von 1 bis 1,5 m verlegten Erdern eingezeichnet. Der spezifische Widerstand der untersuchten Bodenarten liegt zwischen 1550 und 97 000 $\text{Ohm} \cdot \frac{\text{cm}^2}{\text{cm}}$.

Dementsprechend betrug der mit 0,5 m² Erdoberfläche erreichte Widerstand im besten Fall 6,5 Ohm, im ungünstigsten Fall 390 Ohm. Der Vollständigkeit halber muss bemerkt werden, dass bei der Erstellung dieser Versuchserdungen nicht der kleinste erreichbare Widerstand für 0,5 m² Oberfläche angestrebt wurde, sondern ein möglichst geringer Ein-

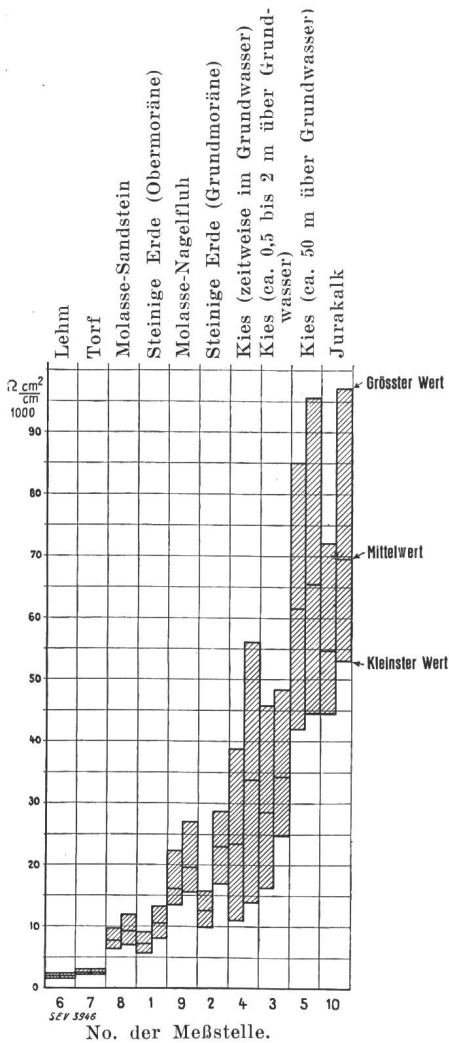


Fig. 2.

Spezifische Widerstände verschiedener Bodenarten.

Ermittelt während zweier Jahre an zwei Erdungen in einer Tiefe von 1 bis 1,5 m unter der Erdoberfläche.

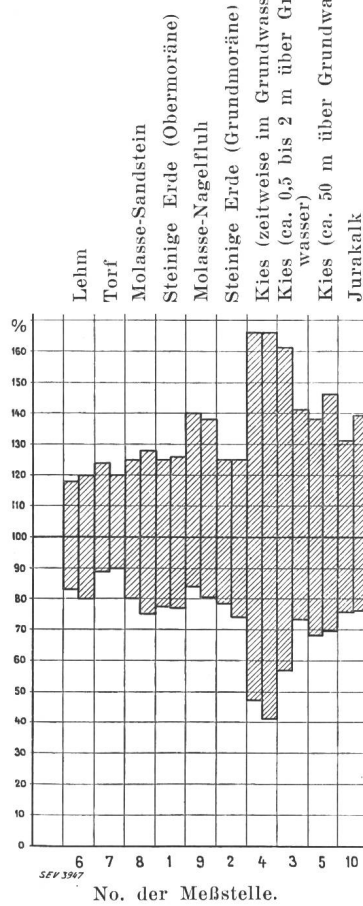


Fig. 3.

Schwankungen des spezifischen Widerstandes verschiedener Bodenarten unter dem Einfluss der Witterung.

Ermittelt an zwei Erdungen in einer Tiefe von 1 bis 1,5 m unter der Erdoberfläche. Mittelwert aus ca. 50 Messungen = 100 %.

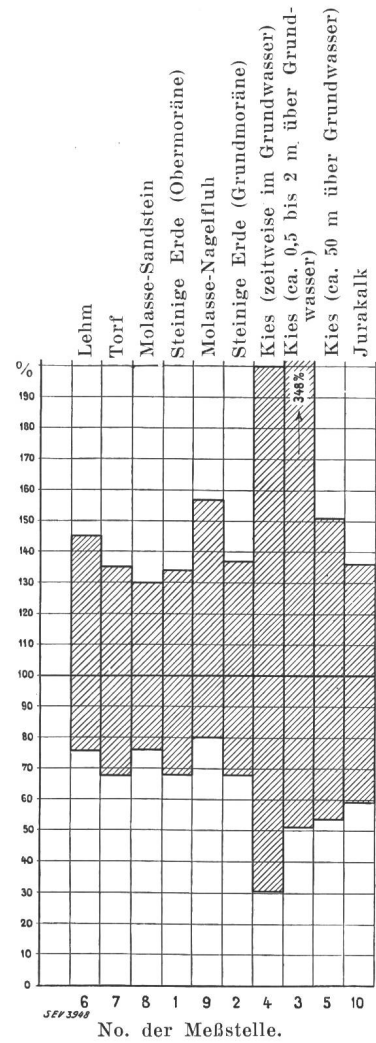


Fig. 4.

Schwankungen von Erdungswiderständen in verschiedenen Bodenarten unter dem Einfluss der Witterung.

Ermittelt in einer Tiefe von 0,5 bis 0,7 m unter der Erdoberfläche. Mittelwert aus ca. 50 Messungen = 100 %.

griff in die von der Natur geschaffenen Bodenverhältnisse.

In Fig. 3 sind die prozentualen Abweichungen vom Mittelwert nach oben und unten aufgetragen. Die Schwankungen des spezifischen Widerstandes sind, wie ersichtlich ist, im Torf am geringsten und im Kiesboden am grössten. Das Verhältnis Höchstwert minus Jahresmittelwert zu Jahresmittelwert minus tiefster Wert ist nicht für alle untersuchten Bodenarten gleich gross; daraus ist zu schliessen, dass die Schwankungen der Widerstandswerte nicht bei allen Bodenarten das gleiche Bild zeigen.

Je weniger tief die Erder verlegt werden, um so grösser werden naturgemäss die Schwankungen des Widerstandes. Sie sind in Fig. 4 für eine mittlere Tiefe von 0,5 bis 0,7 m dargestellt. Weil bei den meisten Meßstellen diese Erder zum Teil in der Humusschicht liegen, hat die Angabe eines spezifischen Widerstandes in diesem Fall keine Berechtigung. Die mit 0,5 m² Erdoberfläche sich ergebenden Widerstände lagen zwischen 8 Ohm für Torf und 626 Ohm für Kiesboden.

Zu Fig. 2 sind noch einige ergänzende Bemerkungen nötig. Bemerkenswert ist der grosse Unterschied der mittleren spezifischen Widerstände für die beiden in der Grundmoräne verlegten Erder. Er ist darauf zurückzuführen, dass bei dem einen Erder der Erdboden etwas lehmig, beim andern etwas sandig war. Mit solchen Ungleichheiten wird im Moränengebiet immer zu rechnen sein. Die gleiche Erscheinung, jedoch weniger stark ausgeprägt, tritt auch bei der Obermoräne auf.

An den drei im Kiesboden verlegten Erdern, die sich durch verschiedene Höhen über dem Grundwasserspiegel unterscheiden, sollte dessen Einfluss auf den Widerstand ermittelt werden. Die Messstellen Nr. 3 und Nr. 4 lagen ca. 200 m voneinander entfernt. Es darf also ungefähr gleiche Beschaffenheit des Kiesbodens für beide Orte angenommen werden. Die Messungen ergaben, dass die Mittelwerte des spezifischen Widerstandes für Kiesboden, der zeitweise im Grundwasser liegt (Meßstelle Nr. 4) und für Kiesboden von 0,5 bis 2 m über dem Grundwasser nicht sehr stark voneinander abweichen, auf jeden Fall weniger stark als die Widerstandswerte der beiden an der gleichen Meßstelle verlegten Erdungen. Der niedrigste Wert, der aufgetreten ist, wenn ein Erder auf seiner ganzen Länge ins Grundwasser eintauchte, ist etwas kleiner, der höchste Wert dagegen, bei welchem der Erder fast trocken lag, noch grösser als beim Erder über dem Grundwasser. Das Einlegen eines Erders ins Grundwasser brachte demnach keine wesentliche Verkleinerung des Widerstandes gegenüber einem unmittelbar über dem Grundwasser liegenden Erder. Dieses Ergebnis ist erklärlich, wenn man annimmt, das wenig über dem Grundwasser liegende Erdreich sei durch die Kapillarwirkung und unter Umständen begünstigt durch eine Schlamm- oder Kiesüberdeckung immer etwas feucht. Immerhin ist es von Vorteil, einen Erder so tief zu verlegen, dass er auch beim tiefsten

Grundwasserstand noch auf seiner ganzen Länge vom Grundwasser benetzt wird, weil dann die durch Austrocknung und Frost bedingten Höchstwerte vermieden werden können.

Der spezifische Widerstand des Kiesbodens, ca. 50 m über dem Grundwasser (Meßstelle Nr. 5), ist um mehr als das Doppelte höher als für den oben besprochenen Kiesboden. Weil auch zu Zeiten grosser Niederschlagsmengen dieses Verhältnis bestehen bleibt, liegt es nahe, die Ursache in der Beschaffenheit des Kiesbodens selbst zu suchen. Diese Annahme scheint gerechtfertigt zu sein, weil die in Betracht kommenden Schotterfelder verschiedenen geologischen Ursprunges sind. Die Meßstellen Nr. 3 und Nr. 4 liegen im Schotter des Linth- und Reussgletschers; die Meßstelle Nr. 5 liegt im Schotter des Rheingletschers. Es ist jedoch eher wahrscheinlich, dass der Unterschied der spezifischen Widerstände auf den Höhenunterschied der Grundwasserspiegel zurückzuführen ist. Im Kiesboden hoch über dem Grundwasser kann das eintretende Niederschlagswasser rasch nach der Tiefe abfließen, so dass das Erdreich in der Nähe der Erdoberfläche weniger Feuchtigkeit zurückhält als unmittelbar über dem Grundwasser.

Zu den im Sandstein, in der Nagelfluh und im Kalkstein verlegten Erdern ist noch folgendes zu bemerken: Von der Ueberlegung ausgehend, dass ein Fels nicht unbedingt einen grossen spezifischen Widerstand aufweisen müsse und dass das Verlegen eines Erders im Fels unter Umständen nötig werden könne, wurden auch diese Gesteine in die Untersuchung einbezogen. Im Zürcher Oberland ist z. B. in gewissen Gegenden der Nagelfluhfels von einer nur ca. 20 cm hohen Humusschicht überdeckt, die für das Verlegen eines Erders mit Rücksicht auf die Schrittspannungen und die grossen Schwankungen der Widerstandswerte kaum verwendet werden kann.

Im Gegensatz zu den übrigen Erdungen konnten die Gruben für die Erder dieser drei Meßstellen nur zum kleinern Teil ausgegraben werden, zum grössten Teil waren Sprengungen nötig. Der untersuchte Molassesandstein, der beim Lagern an der Luft allmählig zerfällt, ist bemerkenswert durch seinen kleinen spezifischen Widerstand, was auf seinen Lehmgehalt zurückzuführen ist. Die Molasse-Nagelfluh ist im Gegensatz zur eiszeitlichen Nagelfluh ein hart verkitteter Fels, der unter Umständen bei geeigneter kleiner Körnung gleich dem Jurakalk als Baustein benützt werden kann. Um die in Nagelfluh und Kalkstein verlegten Erder mit dem Fels in innige Verbindung zu bringen, wurden die Erder in eine 5 bis 10 cm starke Humusschicht eingebettet und die Gruben mit den Felstrümmern aufgefüllt, was hinsichtlich des Verlaufes der Stromlinien keine wesentliche Aenderung des Widerstandes bewirkt. Der Widerstand der Humusschicht wurde an Hand von Vergleichsmessungen berechnet und beim gemessenen Gesamtwert berücksichtigt. Es hat sich denn auch das bemerkenswerte Resultat ergeben, dass es sehr wohl möglich

ist, im untersuchten Molasse-Nagelfluhfels eine Erdung mit relativ niedrigem Widerstand zu erreichen. Vom Jurakalk lässt sich nicht das gleiche sagen, was sich auch schon zum Teil aus der Wasserdurchlässigkeit des Kalksteins erklärt. Bei der Beurteilung der spezifischen Widerstände von Nagelfluh und Kalkstein ist zu beachten, dass die Messungen zeitlich nicht mit den andern Messungen zusammenfallen, und weil die extremen Werte des Jahres 1929 fehlen, dürften die zum Vergleich heranzuziehenden Mittelwerte noch 5 bis 10 % über den angegebenen Werten liegen. In welchem Verhältnis sich in der Nagelfluh und im Kiesboden die Stromleitung auf die groben Bestandteile und auf das Bindemittel verteilt, ist für die Praxis von untergeordneter Bedeutung. Immerhin wäre es von Interesse, durch Versuche dieses Verhältnis zu ermitteln und überhaupt für alle in Frage kommenden Bodenarten durch eingehende Untersuchungen die Beziehungen zwischen Leitfähigkeit und Zusammensetzung des Bodens aufzudecken.

Einen Einblick in diese Beziehungen gewähren die Ergebnisse einiger Messungen, die mit Sonden in Sandgruben ausgeführt wurden. Die angegebenen Werte entsprechen ungefähr dem Jahresmittelwert und beziehen sich auf nicht abgebautes Material.

1. Quarzsand der Meeresmolasse:	ρ in Ohm $\cdot \frac{\text{cm}^2}{\text{cm}}$
a) mit Kalk und Lehm vermischt	9 000
b) rein	ca. 32 000
2. Eiszeitlicher Sand (Kalk- und Quarzsand):	
a) mit Lehm vermischt	ca. 25 000
b) rein	ca. 150 000
3. Als Vergleich sei Meßstelle Nr. 8 aufgeführt:	
Sandstein der obern Süßwassermolasse (Kalk und Quarzsand) mit Lehm vermischt	9 300

Die höhern Werte für ρ unter 2. sind wahrscheinlich auf die geringe natürliche Pressung des Materials zurückzuführen.

Im Gegensatz dazu ergaben Messungen im Lehm Boden für Molasselehm und eiszeitlichen Lehm den gleichen spezifischen Widerstand, nämlich $\rho = \text{ca. } 2000 \text{ Ohm} \cdot \frac{\text{cm}^2}{\text{cm}}$ als Jahresmittelwert.

Um den Einfluss von Temperatur und Niederschlagsmenge auf den Widerstand einigermassen zu ermitteln, wurden die gemessenen Werte, in Prozenten des Mittelwertes ausgedrückt, für die Jahre 1929 und 1930 aufgetragen und darüber die Temperaturkurve und Niederschlagsmenge eingezeichnet. Fig. 5a bis 5c stellen diesen Zusammenhang für zwei Bodenarten dar. Fig. 5b zeigt den normalen Verlauf der Widerstandsänderungen, der für die meisten Bodenarten gilt, und Fig. 5c den Verlauf für zeitweise im Grundwasser liegenden Kiesboden. Die mit a bezeichneten Linien gelten für Erder, die bis fast an die Erdoberfläche reichen, und die bei-

den mit b und c bezeichneten Linien für die tiefer vergrabenen Erder. Diese Darstellung birgt einen gewissen Fehler in sich, weil sich Temperatur und Niederschlagsmenge auf den Ort Zürich beziehen, während die Meßstellen 10 und 15 km von Zürich entfernt sind. Immerhin ist der Zusammenhang zwischen Widerstandsänderung und Witterung deutlich erkennbar. Aus den beiden Temperaturkurven, die sich auf 7 Uhr 30 und 13 Uhr 30 beziehen, kann in bekannter Weise auf die Besonnung geschlossen werden. Kleine Unterschiede zeigen bedeckten Himmel an (Nebel im Winter), grosse Niederschlagsmengen bei kleinen Temperaturunterschieden weisen auf Regen- oder Schneewetter hin. Grosse Niederschlagsmengen bei grossen Temperaturunterschieden lassen auf Gewitter schliessen. Es ist deutlich zu ersehen, dass der Widerstand der bis fast an die Erdoberfläche hinauf reichenden Rohre den Schwankungen der Witterung schneller folgt als der Widerstand der in der Tiefe liegenden Erder. Bei schnellem Witterungswechsel kann die Bewegung der Widerstandswerte sogar gegenläufig werden, was mit der Durchlässigkeit und Aufsaugfähigkeit des Erdreichs im Zusammenhang stehen mag.

Die beiden Jahre 1929 und 1930 waren insofern für die Messungen sehr günstig, als das erste eine grosse Kälteperiode und eine kleine Niederschlagsmenge, das zweite eine abnormal grosse Niederschlagsmenge aufwies. Die Kälteperiode im Februar 1929 kommt in einem starken Ansteigen aller Widerstandswerte zum Ausdruck. Unter dem Einfluss der Niederschläge sinkt dann der Widerstand bis im Juni, um dann zufolge Trockenheit anfangs Oktober wieder ein Maximum zu erreichen, das bei einigen Erdungen noch höher liegt als das Maximum im Februar. Die erste Hälfte des Jahres 1930 bietet nichts bemerkenswertes. Die grosse Niederschlagsmenge im zweiten Halbjahr bringt für alle Erdungen im August den tiefsten Wert.

Die an der Meßstelle Nr. 1 bis heute, also um weitere $3\frac{1}{2}$ Jahre fortgeführten Messungen haben keine wesentlichen Abweichungen von den angegebenen Werten mehr ergeben. Dass diese Messstelle ihrer Bedeutung entsprechend besser eingerichtet wurde und durch eine Strom- und Spannungsmessung die Widerstandswerte an einem Zeigerinstrument jederzeit abzulesen gestattet, sei der Vollständigkeit halber erwähnt.

III.

Um nun mit Benützung der Messergebnisse die Berechnung eines Erders einfach zu gestalten, setzt man für alle Erdungen einen gleichartigen Verlauf der Widerstandsänderungen voraus. Dann ist für zwei beliebige Bodenarten das Verhältnis der Abweichungen vom Mittelwert jederzeit konstant, die Abweichungen lassen sich proportional umrechnen. Bei dieser Berechnungsart wird allerdings ein Fehler gemacht, weil die Voraussetzung nur angenähert zutrifft. Er dürfte am kleinsten sein, wenn man der Berechnung den Jahresmittelwert zugrunde legt.

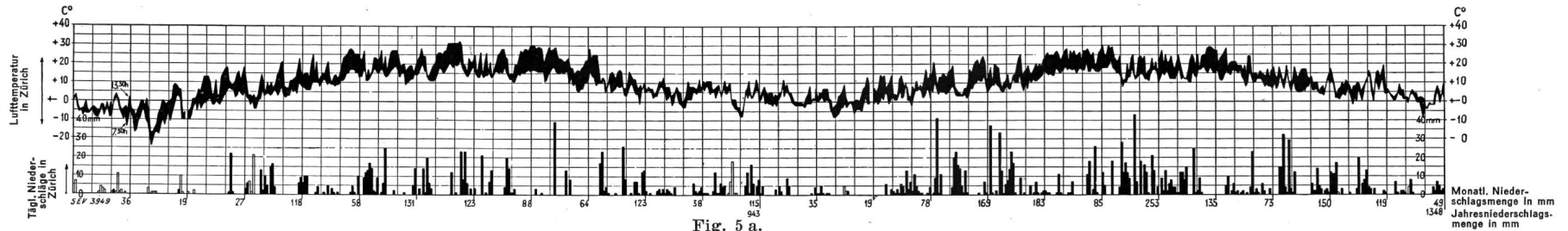


Fig. 5 a.
Diagramm der Niederschläge und der Lufttemperatur in Zürich in den Jahren 1929 und 1930.

Regen Schnee

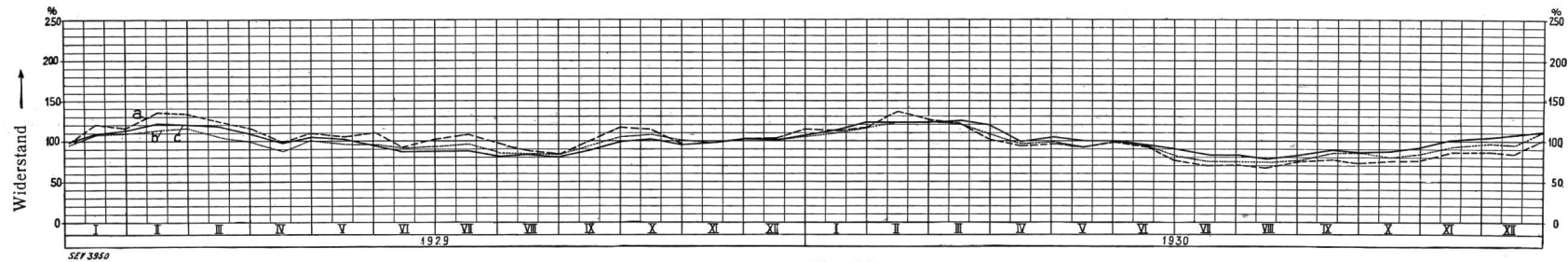


Fig. 5 b.
Aenderung des Widerstandes an der Meßstelle No. 2, Affoltern a. A. Bodenart: Steinige Erde (Grundmoräne).

Mittelwert aus allen Messungen 1929/30 = 100 %
 für a (oberes Rohrende 5 cm unter der Erdoberfläche) 100 % = 57,5 Ω entsprechend einem spez. Widerstand von $12,6 \cdot 10^8 \Omega \text{ cm}^2/\text{cm}$
 für b (oberes Rohrende 90 cm unter der Erdoberfläche) 100 % = 93,6 Ω entsprechend einem spez. Widerstand von $23,1 \cdot 10^8 \Omega \text{ cm}^2/\text{cm}$
 für c (oberes Rohrende 90 cm unter der Erdoberfläche) 100 % = 51 Ω entsprechend einem spez. Widerstand von $12,6 \cdot 10^8 \Omega \text{ cm}^2/\text{cm}$

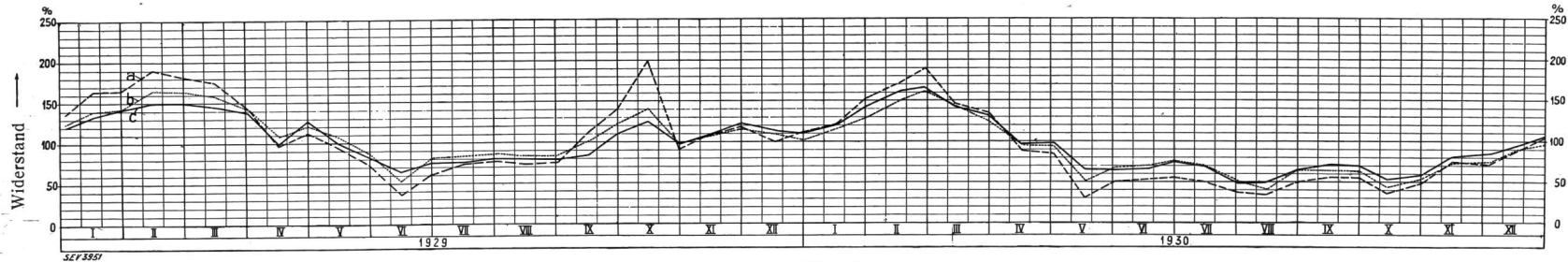


Fig. 5 c.
Aenderung des Widerstandes an der Meßstelle No. 4, Dietikon. Bodenart: Kies, zeitweise in Grundwasser.

Mittelwert aus allen Messungen 1929/30 = 100 %
 für a (oberes Rohrende 5 cm unter der Erdoberfläche) 100 % = 170,2 Ω entsprechend einem spez. Widerstand von $37,4 \cdot 10^8 \Omega \text{ cm}^2/\text{cm}$
 für b (oberes Rohrende 70 cm unter der Erdoberfläche) 100 % = 138,3 Ω entsprechend einem spez. Widerstand von $33,7 \cdot 10^8 \Omega \text{ cm}^2/\text{cm}$
 für c (oberes Rohrende 70 cm unter der Erdoberfläche) 100 % = 95,5 Ω entsprechend einem spez. Widerstand von $23,3 \cdot 10^8 \Omega \text{ cm}^2/\text{cm}$

Fig. 5.
Aenderung des Widerstandes einer Rohrerdung von 0,5 m² Oberfläche in den Jahren 1929 und 1930 in Affoltern a. A. (Fig. 5 b) und in Dietikon (Fig. 5 c) in Abhängigkeit von Lufttemperatur und Niederschlagsmenge (Fig. 5 a).

Beispiel: Im Lehm Boden sei eine Erdung mit 20 Ohm Widerstand in einer Tiefe von 1 m zu verlegen. Mit einer Sonde von 30 cm Länge und 15 mm Durchmesser misst man in dieser Tiefe einen Widerstand von beispielsweise 46 Ohm. Aus Formel *b*) ergibt sich für diese Erdung ein spezifischer Widerstand von $50 \cdot 46 = 2300 \text{ Ohm} \cdot \frac{\text{cm}^2}{\text{cm}}$. Von der ständigen

Meßstelle erhält man die Auskunft, der Widerstand ihrer Erdung liege z. B. zur Zeit 10 % über dem Jahresmittelwert. Der Höchstwert wurde zu 26 % über dem Jahresmittelwert bestimmt. Den Höchstwert für Lehm Boden entnimmt man der Fig. 3 zu 20 % über dem Jahresmittelwert. Der gemessene Wert wird also mutmasslich $\frac{10}{26} \cdot 20 = 8 \%$ über dem

Jahresmittelwert für Lehm Boden liegen, und der der Rechnung zu Grunde zu legende Höchstwert wäre zu $2300 \cdot \frac{100+20}{100+8} = 2550 \text{ Ohm} \cdot \frac{\text{cm}^2}{\text{cm}}$ anzunehmen. Liegt der von der ständigen Meßstelle angegebene Wert unter 100 %, so hat man selbstverständlich mit den untern Grenzwerten zu rechnen. Die Abmessungen der Erder sind beliebig zu wählen, sofern die einschlägigen Vorschriften, z. B. für Starkstromanlagen Art. 23 und 24 der Starkstromverordnung, erfüllt sind. Das Bestreben, mit den geringsten Erstellungskosten auszukommen, wird im allgemeinen wegleitend sein. Man kommt am schnellsten zum Ziel, wenn man untersucht, was sich mit dem in Frage kommenden Material, Band, Rohr usw., bei verschiedenen Längen für Widerstandswerte ergeben, und diese graphisch aufträgt, so dass der gesuchte Wert einer Kurve entnommen werden kann.

Messungen, die bis heute an einer Anzahl nach dieser Methode vorausgerechneten Erdungen vorgenommen wurden, ergaben vorläufig nur Fehler von 5 bis 20 %, womit die Brauchbarkeit dieses Verfahrens erwiesen ist. Durch einen Zuschlag in dieser Grössenordnung kann man in den meisten Fällen die Ungenauigkeit der Rechnung zum vornherein berücksichtigen. Die ausgeführten Erdungen können jederzeit wieder die Rolle von Meßstellen übernehmen, so dass es möglich sein wird, an Hand der Messergebnisse die angegebene Tabelle zu verbessern und zu ergänzen.

Freilich wird man auch hie und da keine Uebereinstimmung zwischen Rechnung und Messung feststellen können. Dies wird erstens dann der Fall sein, wenn der Erdboden aus Schichten verschiedenen Materials von ungleicher Leitfähigkeit besteht, z. B. aus einer gutleitenden Schicht auf schlechtleitendem Untergrund. Für solche Fälle gelten die angegebenen Formeln nicht mehr. Ferner werden auch dann Differenzen auftreten, wenn man in einer Bodenart misst, deren Widerstandsänderungen einen ganz anderen Verlauf zeigen als eine der untersuchten Bodenarten. Die Ursachen können in der Zusammensetzung des Bodens, in der Bodengestaltung, im Grundwasserstand und dergleichen liegen. Die untersuchten Bodenarten lagen zum grössten Teil im ebenen, offenen Gelände. Erdungen, die an steilen, sonnigen Abhängen liegen, werden sicher ein anderes Verhalten zeigen. Einzelne Messergebnisse lassen vermuten, dass auch der Pflanzenwuchs die Widerstandsänderung beeinflussen kann. Auch hier wird man aus den Unstimmig-

keiten neues Material zu Berechnungsgrundlagen sammeln.

Bei ziemlich dünnen Erdern ist der Widerstand, der auf den ersten Meter entfällt, ein relativ grosser Anteil des Gesamtwiderstandes. Man hat also in erster Linie der nächsten Umgebung des Erders seine Aufmerksamkeit zu schenken und namentlich darauf zu achten, dass beim Einfüllen der Grube keine grossen Steine direkt am Erder anliegen. Ein Einstampfen und mässiges Einschwemmen des Erdreiches ist immer zu empfehlen, weil andernfalls der endgültige Widerstandswert sich erst nach langer Zeit einstellt.

An Hand der in Fig. 2 zusammengestellten Werte für den spezifischen Widerstand kann man sich nun ein Bild darüber machen, welcher Aufwand an Mitteln zur Erreichung einer Erdung von bestimmtem Widerstand in verschiedenen Bodenarten nötig ist. Nehmen wir z. B. den Wert von 20 Ohm an, der in Art. 23, Ziffer 2, der Starkstromverordnung verlangt wird. Da lange, dünne Bänder pro Gewichtseinheit die kleinsten Erdungswiderstände ergeben, sei ein gestrecktes Band angenommen, dessen Abmessungen nach Art. 24, Ziffer 4, mindestens $30 \cdot 3 \text{ mm}$ betragen müssen. Für 20 Ohm Widerstand beträgt die nötige Bandlänge *l* bei den untersuchten Bodenarten:

In Lehm- und Torfboden wenn

$$\rho = 3 \cdot 10^3 \text{ Ohm} \cdot \frac{\text{cm}^2}{\text{cm}} \quad l = 1,3 \text{ m}$$

In Sandstein u. steiniger Erde I

$$13 \cdot 10^3 \quad \gg \quad 9 \text{ m}$$

In Nagelfluh u. steiniger Erde II

$$29 \cdot 10^3 \quad \gg \quad 24 \text{ m}$$

In Kiesboden I

$$56 \cdot 10^3 \quad \gg \quad 55 \text{ m}$$

In Kiesboden II und Kalkstein

$$96 \cdot 10^3 \quad \gg \quad 103 \text{ m}$$

Die Verlegung von 55 oder gar 103 m langen Erdbändern ist, sofern es sich nicht um grosse und wichtige Anlagen handelt, nicht nur unwirtschaftlich, sondern vielerorts undurchführbar. Eine Verbreiterung des Bandes, z. B. auf die doppelte Breite, oder eine grössere Verlegungstiefe bringen, wie sich aus der Rechnung ersehen lässt, ganz geringfügige Ersparnisse an der Länge. In solchen Fällen bewahrt uns die Rechnung vor kostspieligen Versuchen. Wo es sich um Schutzerdungen handelt, mag es unter Umständen gelingen, durch zweckmässige Anordnung des Erders trotz des höhern Widerstandes die Berührungs- und Schrittspannungen so klein zu halten, dass der Zweck der Erdung erreicht wird. Ist dies nicht möglich, oder sind, wie z. B. bei der Schutzerdung in Niederspannungsanlagen, noch kleinere Erdungswiderstände nötig, so kann die Erdung in Bodenarten mit so hohem spezifischen Widerstand als Schutzmassnahme überhaupt nicht mehr in Frage kommen; sie muss durch andere Mittel ersetzt werden.