

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins
Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke
Band: 42 (1951)
Heft: 10

Artikel: Stosswiderstände der verschiedenen Erdelektroden und Einbettungsmaterialien
Autor: Norinder, H. / Salka, O.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1060991>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. 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. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

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. [Voir Informations légales.](#)

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. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 16.05.2025

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

BULLETIN

DES SCHWEIZERISCHEN ELEKTROTECHNISCHEN VEREINS

Stosswiderstände der verschiedenen Erdelektroden und Einbettungsmaterialien

Von H. Norinder und O. Salka, Uppsala

621.316.993.015.33

In der Arbeit wird über eine Versuchsreihe in Schweden berichtet. Die Versuche hatten den Zweck, zwei von den vielen Einflüssen auf den Stosswiderstand von Erdelektroden abzuklären, bzw. zu untersuchen: die Spurenwirkung und den Einfluss von Einbettungsmaterialien. Die Versuche werden eingehend geschildert, die Resultate zusammengestellt und daraus Schlüsse gezogen.

Rapport sur une série d'essais entrepris en Suède, dans le but d'étudier deux des nombreuses influences exercées sur la résistance de choc d'électrodes de terre, à savoir l'effet de pointe et l'influence des matières dans lesquelles sont logées les électrodes. Les essais sont décrits en détail, leurs résultats sont comparés et les conclusions qui s'imposent en sont déduites.

1. Einleitung

Bekanntlich ist der Erdwiderstand nicht nur von der Art des Bodens und der Elektrodenform, sondern auch von der Art der Beanspruchung abhängig. Die Erdwiderstandswerte sind bei konstanten, aber kleinen Strömen und bei Stossbeanspruchung mit grossen Strömen verschieden. Man spricht von einem Niederfrequenzwert (bei 50, bzw. 60 Hz) und von Stosswiderstandswert des Erdwiderstandes. Über das Verhalten des Erdwiderstandes bei Stossbeanspruchung liegen viele Messungen vor. Bemerkenswert sind die Versuche von Towne [1]¹⁾, Norinder [2, 7], Nordell [2], Baatz [3], Bellaschi [4], Davis und Johnston [5], Berger [6], Petropoulos [7, 8]. Die Versuche zeigen, dass der Erdwiderstand mit wachsender Spannung sich vermindert und die Widerstandskurve bei Stossbeanspruchung eine ausgesprochene Schleife darstellt. Die Widerstandsabnahme wird durch Kontaktwiderstände erklärt, die zwischen den einzelnen, gut leitenden Bodenteilchen liegen und bei höherer Spannung in der Nähe der Elektroden durchgeschlagen werden. Dieser Prozess wird durch die an der Elektrode angebrachten Spitzen unterstützt [7, 8], und es wurde vermutet, dass auch die Einbettung der Elektrode in gewissen gut leitenden Materialien, sog. Einbettungsmaterialien, eine gute Wirkung auf die Verminderung des Widerstandes ausübt.

Im allgemeinen ist die Erdungsfrage der elektrischen Netze, der Blitzschutzanlagen usw. sehr wichtig, und es muss besonders in Schweden diesem Problem eine grosse Aufmerksamkeit geschenkt werden, um so mehr, als im nördlichen Teil des Landes sehr häufig schlechte Erdungsmöglichkeiten anzutreffen sind. Aus diesem Grund hat das Institut für Hochspannungsforschung in Uppsala in Zusammenarbeit mit der Generaldirektion der Schwedischen Staatlichen Kraftwerke eine Untersuchungsreihe für die Erforschung der günstigen Elektrodenart in sein Arbeitsprogramm aufgenommen. Die vorliegende Arbeit berichtet über die ersten Versuche

der vorgesehenen Versuchsreihe. Diese sind als Erweiterung der bereits im Jahre 1937 angefangenen Versuche [2, 7] zu werten und sollen die Einflüsse der Elektrodenform auf den Stosswiderstand feststellen, bzw. die Wirkung der Einbettungsmaterialien auf den Erdwiderstand näher erklären. Als Einbettungsmaterial wurden Holzkohle und Eisenerzpulver (Magnetit) verwendet, als Elektrode gestrecktes Kupferseil, glatt oder mit Stacheln versehen.

2. Versuchsstelle und Messapparatur

Die Versuche wurden in freiem Feld bei natürlichen Verhältnissen durchgeführt. Es wurde der spezifische Widerstand der Erde mit Hilfe einer Erdwiderstands-Messbrücke (Megger) an verschiedenen Stellen des ausgewählten Geländes mit 4 Hilfs Elektroden nach der Wennerschen Methode gemessen [9] und eine Stelle mit hohem spezifischem Widerstand lokalisiert. Diese Stelle lag am Rande eines Waldes. Die genaue geologische Struktur wurde mit 40 Bohrungen, bei einer maximalen Bohrtiefe von 3,25 m, festgestellt. In der Tabelle I sind die Resultate der wichtigsten Bohrungen zusammengestellt (siehe auch Fig. 1). Zur Tabelle I ist zu bemerken, dass die Oberfläche der Versuchsstelle mit Gras bedeckt war, unter dem sich eine 20 cm dicke, humusartige Sandschicht ausbreitete. Die tieferen Schichten des Sandes bestanden aus gelbem, quarzhaltigem Sand. Auf Grund der Tabelle I ergibt sich folgende geologische Struktur der Versuchsstelle: Die obere Schicht besteht aus Sand, dessen Dicke verschieden ist; darunter befindet sich an einigen Stellen Lehm. Die Lehmschicht ist entweder sehr dick oder ist eine mehr oder weniger dünne Schicht, unter der wieder eine Sandschicht sich befindet. Die Sandschicht stützt sich auf Granit, der eine flache Mulde bildet. Für die Versuche waren diejenigen Stellen geeignet, an welchen die Sandschicht ohne Lehmzwischenschicht bis zum Fels reicht. Dieser Teil der Versuchsstelle ist in Fig. 1 mit einer punktierten Linie angegeben. Die Stelle in der Grösse von 22 × 24 m kann folgen-

¹⁾ siehe Literatur am Schluss.

Resultate der wichtigsten Bohrungen an der Versuchsstelle

Tabelle I

Nr. der Bohrung	Geologische Struktur bei einer Bohrtiefe von m				
	Sand	Lehm	Sand	Fels	Grundwasser
1	0...3,25	—	—	—	3,2
7	0...1,28	1,28...2,13 ¹⁾	—	—	—
8	0...1,45	—	—	—	1,45
9	0...0,73	0,73...1,65 ¹⁾	—	—	—
11	0...1,6	—	—	1,6	—
12	0...0,8	0,8 ...1,3	1,3 ...2,1	2,1	—
13	0...0,8	0,8 ...1,2	1,2 ...1,7	1,7	—
14	0...1,8	—	—	1,8	—
15	0...2,85	—	—	2,85	—
16	0...2,25	—	—	2,25	—
17	0...2,45	—	—	2,45	—
18	0...1,25	1,25...2,2 ¹⁾	—	—	—
19	0...1,05	1,05...1,4	1,4 ...1,56	1,56	—
21	0...0,6	0,6 ...0,8	0,8 ...1,95	3,0	—
		1,95...2,15	2,15...3,0	—	—
22	0...0,75	—	—	0,75	—
23	0...0,6	0,6 ...1,0	1,0 ...2,1	2,1	—
24	0...1,35	—	—	—	1,35
25	0...1,35	—	—	—	1,35
29	0...0,8	0,8 ...1,85	1,85...3,0	—	3,0
30	0...1,7	—	—	—	1,7
33	0...1,0	1,0 ...1,2	1,2 ...2,4 ¹⁾	—	—
35	0...1,4 ¹⁾	—	—	—	—
36	0...0,6	0,6 ...1,1	1,1 ...1,4 ¹⁾	—	—
37	0...1,4 ¹⁾	—	—	—	—
38	0...1,6 ¹⁾	—	—	—	—

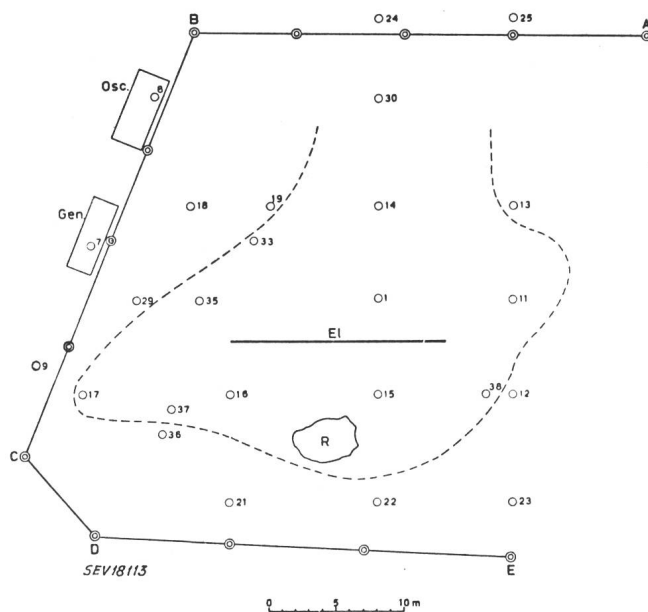
¹⁾ kontinuierlich

Fig. 1

Grundriss der Versuchsstelle

- El. Versuchselektrode; Gen. Stoss-generator;
 Osc. Oszillographenwagen; R der zutage tretende Fels
 ⊙ Erdelektroden der Messeinrichtung
 ○ Bohrstellen
 --- Lehmgränze

dermassen beschrieben werden: Eine Mulde im Granit ist mit gelbem, quarzhaltigem Sand gefüllt. Die grösste Tiefe der Mulde ist ungefähr in der Mitte und beträgt 3,25 m, die kleinste am Rande des Platzes und beträgt nur 1,6 m. Nur in dem tiefsten Punkt der Mulde (Bohrung Nr. 1) ist Grundwasser in einer Tiefe von 3,2 m festgestellt worden.

Der Feuchtigkeitsgehalt des Sandes war während der Versuche an der Oberfläche (Humusschicht) 12...15% und in den tieferen Sandschichten 7...12%.

In der Mitte dieser Versuchsstelle wurden verschiedene Erdelektroden an derselben Stelle vergraben. Die Versuchselektroden bestanden aus 16 m langen, gestreckten 25-mm²-Kupferseilen in folgenden Anordnungen:

1. Kupferseil, in einer Tiefe von 25 bzw. 60 cm vergraben.
2. Kupferseil mit 5 cm langen Stacheln (aus 3,5-mm-Kupferdraht, gespitzt); Zahl der Stachel: 20 Stück pro m; Eingrabetiefen: 25 bzw. 60 cm.
3. Kupferseil wie unter Ziff. 2, aber mit 10 cm langen Stacheln.
4. Kupferseil, mit 20 cm langen, in den Graben gleichmässig über das Kupferseil gestreute Stacheln.
5. Kupferseil, mit einer Eisenerzpulver-Schicht (20 × 1,5 cm) umgeben, in einer Tiefe von 25 cm.
6. Kupferseil, in einer Tiefe von 25 cm vergraben und mit einer Schicht von Holzkohlenstaub bzw. mit Holzkohle umgeben.

Die Einbettung der Elektrode geschah folgendermassen: In dem Graben wurde die Elektrode platziert, etwas reiner Sand darauf geschüttet und gestampft; darauf reiner Sand gefüllt bis zur gleichen Höhe wie im gewachsenen Boden und wieder gestampft. Darauf kam die obere Humussandschicht mit dem Rasen zu liegen (20 cm). Auf diese Weise wurde die Kontinuität der Erdoberfläche aufrechterhalten. Bei jenen Versuchen, wo zusätzliche Einbettungsmaterialien verwendet wurden, hatte man den überflüssigen Aushub entfernt und, wenn es notwendig war, reinen Sand von derselben Beschaffenheit und Feuchtigkeit zusätzlich nachgefüllt und gestampft. Obwohl das Wetter während der Versuchsperiode (31. August bis 12. September) nicht regnerisch war, war die Luftfeuchtigkeit doch so gross, dass die Feuchtigkeit des Sandes bei der Umgrabung nur in geringem Masse sich geändert hat.

Der Stossgenerator und die Oszillographen waren mit 13 vertikal eingetriebenen Rohrelektroden (26 mm Durchmesser, 2,5 m lang) geerdet (in Fig. 1 mit A...E bezeichnet). Für diese Elektroden wurden diejenigen Stellen der Versuchsstelle ausgesucht, wo man in geringer Tiefe entweder auf Grundwasser oder auf eine Lehmschicht stiess. Der Erdwiderstand der einzelnen Rohrelektroden schwankte zwischen 19 und 110 Ω (mit Megger und 2 Hilfselektroden gemessen). Alle 13 Rohrelektroden wurden mit einem 6-mm²-Kupferdraht verbunden. Dadurch entstand ein Erdungssystem mit einem Erdwiderstand von 2,5 Ω.

Bei den erwähnten Elektrodenanordnungen wurden gemessen: 1. der Stosswiderstand bei negativer Polarität und verschiedenen Spannungen und 2. der Niederfrequenzwiderstand bei 50 Hz.

Der Stossgenerator bestand aus 4 Stufen von je 0,32 μF Kapazität. Bei 40...500 kV Spannung waren alle 4 Stufen in Serie geschaltet, so dass der Generator im ganzen eine äquivalente Kapazität von 0,08 μF besass. Bei einer Spannung von 20 kV wurden nur 2 Stufen, bzw. bei 10 kV nur eine Stufe ausgenützt; in diesem Falle betrug die äquivalente Kapazität des Stossgenerators 0,16 bzw. 0,32 μF. Die

Wellenform der angewendeten Stoßspannung (Fig. 2) änderte sich mit der Einstellung des Stossgenerators. Die Frontzeit variierte zwischen 2,4...5,7 μ s und für die Halbwertzeit des Rückens zwischen 14,5...49 μ s, wobei die grösseren Werte der kleineren Stoßspannung entsprechen.

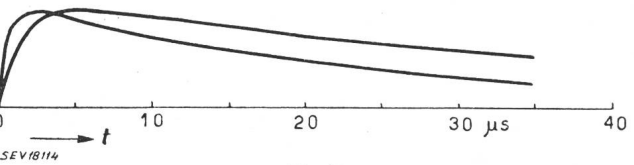


Fig. 2
Grenzwellen der angewendeten Stoßspannung
t Zeit

Die Messungen wurden mit 3 Kathodenstrahl-Oszillographen durchgeführt, und zwar wurde mit je einem Oszillograph der Spannungs-, Strom- und Widerstandsverlauf an der Versuchselektrode gleichzeitig gemessen. Da die Erdung der Messanordnung nur einen Widerstand von 2,5 Ω besass, konnte dieser gegenüber der Versuchserdung in der Regel vernachlässigt werden. Fig. 3 stellt die Schaltung der Apparatur schematisch dar.

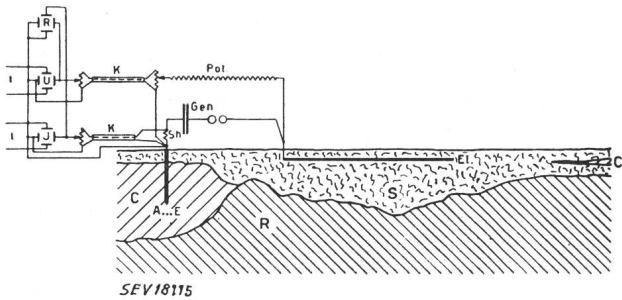


Fig. 3
Schema der Messanordnung

EL. Versuchselektrode; S, C, R Sand, Lehm und Fels (Granit); A...E Erdung der Messeinrichtung; Gen. Stossgenerator; Pot. Spannungspotentiometer; Sh Shunt für Strommessung; K Kabel; R, U, I Oszillographen für Widerstands-, Spannungs- und Strommessungen; t Zeitbasis

3. Messergebnisse

a. Allgemeine Bemerkungen

Die Oszillogramme zeigen, dass die Widerstandskurven bei grösseren Spannungen mehr oder weniger ausgeprägte Schleifen bilden. In Fig. 4 ist ein

$$R_{imp} = \frac{\hat{U}}{\hat{I}}$$

Es ist noch zu bemerken, dass die Länge der gestreckten Elektrode bei der gegebenen Spannungswelle verhältnismässig klein ist, so dass das Problem des Wellenwiderstandes nicht in Erscheinung tritt.

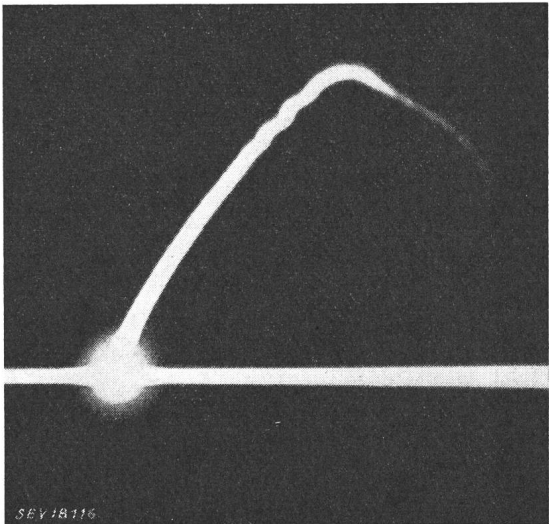


Fig. 4
Oszillogramm einer typischen Widerstandsschleife
vertikal: Spannung; horizontal: Strom

b. Kupferseil im Sand

Es gibt mehrere Formeln für die Berechnung des Erdwiderstandes dieser oft angewendeten Elektrodenform (horizontal vergrabenes Seil). Wir benützen die von Dwight [10] gegebene Formel

$$R = \frac{\varrho}{4 \pi l} \left(\ln \frac{4 l}{r} + \ln \frac{4 l}{s} - 2 \dots \right)$$

für Berechnung des mittleren spezifischen Widerstandes ϱ der Erdmasse, nachdem alle übrigen Größen dieser Formel bekannt sind (Länge $2 l = 16$ m, Durchmesser $2 r = 6,5$ mm, Eingrabetiefe $s/2$, Niederfrequenzwiderstand bei 50 Hz R , mit einer Messbrücke gemessen). Die Resultate sind in der Tabelle II zusammengestellt.

Versuchsergebnisse bei horizontal in Sand eingegrabenem Cu-Seil als Erdelektrode			Tabelle II
Eingrabetiefe	cm	25	60
Zustand der Erde		gestampft	gestampft
Niederfrequenzwiderstand	Ω	235...250	275...285
Spezifischer Widerstand	Ω m	2080...2210	2640...2740
Spezifischer Widerstand im Mittel	Ω m	2145	2690
			365...370
			3510...3550
			3530

für alle Versuche typisches Oszillogramm einer Widerstandsschleife wiedergegeben. Als Stosswiderstand der Erdelektrode nehmen wir den Quotienten der Scheitelspannung $\hat{U}$ zu dem entsprechenden Stromwert $\hat{I}$ an. Also

Da die Versuche an demselben Tage unter gleichen Verhältnissen und bei gleicher Feuchtigkeit durchgeführt wurden, darf man aus den Zahlen der Tabelle II folgende Schlüsse ziehen:
Der spezifische Widerstand und damit auch der

Niederfrequenzwiderstand sind gegen den Zustand der in unmittelbarer Nähe der Elektrode liegenden Erde empfindlich. Lose (ohne zu stampfen) eingeschüttete Erde erhöht den Wert des Erdwiderstandes, in unserem Falle um 65%. Der höhere spezifische Widerstand im Falle der Eingrabetiefe von 60 cm gegenüber derjenigen von 25 cm ist wahrscheinlich auch auf die ungleiche Dichte der Erde zurückzuführen. Dieser Umstand zwingt uns, im weiteren für den Vergleich der einzelnen Kurven des Stoss widerstandes die absoluten Werte vorzuziehen. Das ist um so vorteilhafter, als die Erd elektroden in allen Fällen gleiche Masse hatten. Die Anwendung des unsicheren, von der Dichte der Erde abhängigen Niederfrequenzwiderstandes als Bezugsbasis für die prozentuale Verminderungskurve kann als irreführend betrachtet werden.

Ermittlung von Stoss widerständen bei im Sand horizontal eingebettetem Cu-Seil

Tabelle III

Kurve	Eingrabetiefe cm	Zustand der Erde	Niederfrequenz- widerstand Ω	Spannung kV	Strom A	Stoss- wider- stand Ω
1	25	gestampft	250	28,5	150	190
				38,3	212	181
			65		416	156,5
			245	141	995	142
2	60	locker	370	12,5	47,5	264
				21,7	88,8	244
				34,2	152	225
				84	532	158
3	60	gestampft	365	164	2010	81,5
			285	12	55,7	215
				22,4	118	189
				35,5	180	197
				88	572	154
				145	1864	78
			275	161	1950	82,3

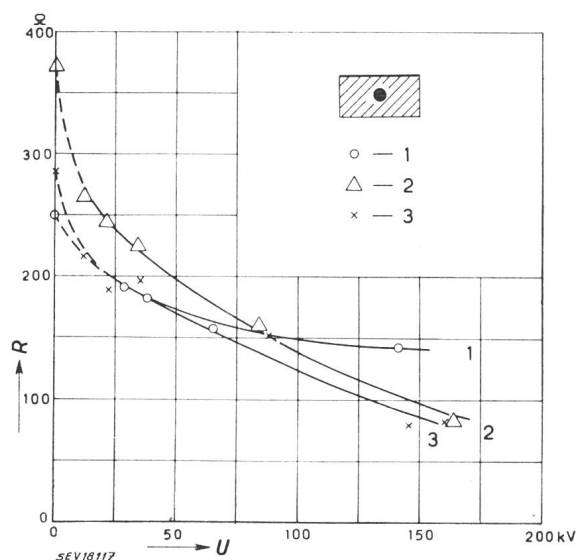


Fig. 5

Stoss widerstandskurven des gestreckten Kupferseiles (25 mm², 16 m lang) im Sand

- 1, 3 Eingrabetiefe 25 cm; bzw. 60 cm; Erde gestampft
2 Eingrabetiefe 60 cm; Erde nicht gestampft
R Stoss widerstand; U Stoßspannung

Für die drei in der Tabelle II angegebenen Elektrodenanordnungen wurden auch die Stoss widerstände gemessen. Die Resultate sind in der Tabelle III zusammengestellt und in Fig. 5 in Kurvenform wiedergegeben.

Bekanntlich vermindert sich der Stoss widerstand mit der Spannung. Die Verminderung ist bei tiefer eingegrabenen Elektroden ausgeprägter. Bei genügend hoher Spannung ist der Widerstand unabhängig vom Zustand der die Elektroden unmittelbar umhüllenden Erde, d. h. die Stoss widerstände bei gestampfter bzw. loser Erde sind fast gleich (Kurve 2 und 3 in Fig. 5).

c. Stacheldraht im Sand

Für die Feststellung der Spitzenwirkung wurde derselbe Kupferdraht mit 5 bzw. 10 cm langen Stacheln versehen. Der Tabelle IV ist zu entnehmen, dass der Stoss widerstand bei einer Stoßspannung von 150 kV bis auf einen Wert von 65...80 Ω gesunken ist (siehe auch Fig. 6).

Versuchsergebnisse bei horizontal in Sand eingebettetem Cu-Seil mit Stacheln aus 3,5 m gespitztem Kupferdraht, 5 bzw. 10 cm lang, 20 Stück pro m

Tabelle IV

Kurve	Stachel- länge cm	Eingrabetiefe cm	Niederfrequenz- widerstand Ω	Stoss- spannung kV	Strom A	Stoss- widerstand Ω
1	5	25	215	11,7	75,5	155
				34,8	242	144
				42,2	352	120
			210	60,2	488	123
				132,5	1662	79,5
				145,3	1715	84,7
2	10	25	205	19,3	125	154
				25,6	187	137
				42,3	303	140
			195	64	546	117
					1850	76
3	5	60	245	10	51,7	192,5
				18,2	101	180
				29,2	166,5	175
			255	46,7	286	163,5
				75	572	131
				150	1840	81,5
4	5	60	230	15,8	85,3	185
				23,7	138,5	171
				37,2	236	158
			240	66	525	126
				129	1960	65,9
5	20 ¹⁾	25	230	10,2	53,7	190
				32,8	195	168
				46	286	161
			240	68	535	127
				91	701	130
				183	2360	77,5

¹⁾ lose Stachel

Der Einfluss der verschiedenen Prüfbedingungen (Eingrabetiefe 25 und 60 cm, Stachellänge 5 bzw. 10 cm, sowie quer über das Seil lose eingeworfene 20 cm lange Stacheln) ist auf den Stoss widerstand nicht gross. Zu bemerken ist, dass der Stacheldraht mit 10 cm langen Stacheln in 60 cm Tiefe den

kleinsten, das Seil mit losen Stacheln den grössten Widerstand aufweist.

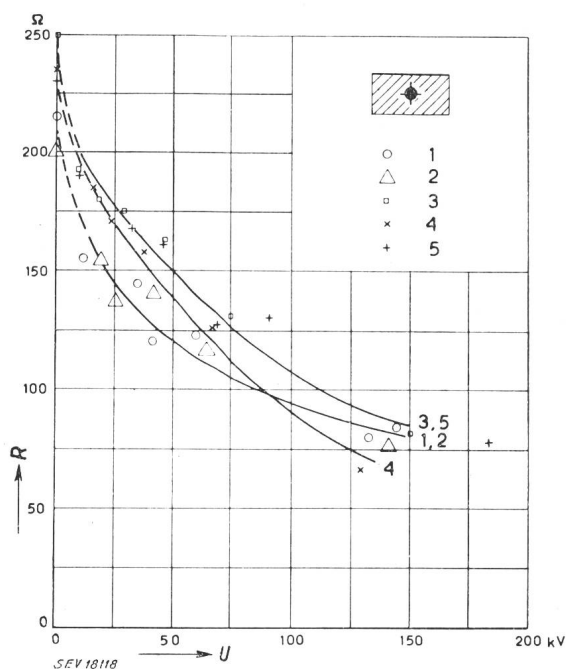


Fig. 6

Stoss widerstandskurven des Stacheldrahtes im Sand

- 1, 2 Eingrabetiefe 25 cm, Stachelnlänge 5 bzw. 10 cm
3, 4 Eingrabetiefe 60 cm, Stachelnlänge 5 bzw. 10 cm
5 lose, 20 cm lange Stachel; Eingrabetiefe 25 cm

d. Das Kupferseil in Magnetitpulver eingebettet

Dem Einfluss der Einbettungsmaterialien auf den Stoss widerstand wurden weitere Untersuchungen gewidmet. Bei der ersten Versuchsreihe wurde als Einbettungsmaterial Magnetitpulver verwendet. Am Boden eines 25 cm tiefen Grabens wurde eine 20 cm breite und 1,5 cm dicke Magnetitpulver-Schicht hergestellt und das Seil in die Schicht eingebettet.

Versuchsergebnisse bei horizontal eingebettetem Cu-Seil

- a) in Magnetitpulverschicht ($20 \times 1,5$ cm); Eingrabetiefe 25 cm;
b) in 12%igem Magnetitpulver-Sand-Gemisch (20 cm breit, 25 hoch); Eingrabetiefe 20 bzw. 45 cm

Tabelle V

Kurve	Niederfrequenzwiderstand Ω	Stoßspannung kV	Strom A	Stoss widerstand Ω
1	240	9,8	66,5	147
		18,6	135	138
		29,2	231	126
		39,2	321	122
		57,9	525	110
		66,7	605	110
	200	127	1376	93
2	230	147	1610	91
		9,5	63,2	151
		19,9	145	137
		21,1	170	124
		41,5	364	114
		51,8	439	103,5
	190	71,5	674	106

Nachher wurde der Graben mit Sand gefüllt, gestampft und mit Rasen bedeckt. Im zweiten Versuch wurde das Magnetitpulver mit Sand vermisch (12% Magnetit + 88% Sand). Das Magnetit-

Sand-Gemisch war 20 cm breit und 25 cm hoch. In der Mitte des Gemisches wurde ein Kupferseil verlegt, dann die Mischung gestampft, der Graben mit 20 cm Humussand nachgefüllt und mit Rasen bedeckt. Tabelle V und Fig. 7 zeigen die Messresultate bei dieser Anordnung der Erdelektrode.

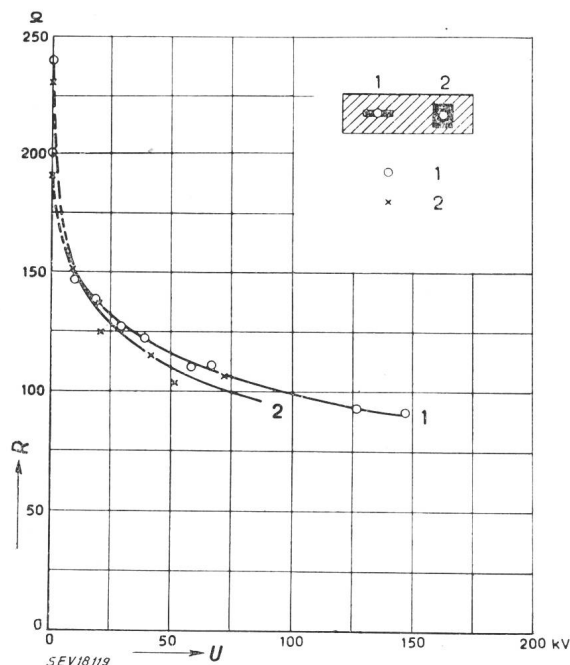


Fig. 7

Stoss widerstandskurven des Kupferseiles in Magnetitpulver

- 1 Seil in $20 \times 1,5$ cm Magnetitpulverschicht; Eingrabetiefe 25 cm
2 Seil in 12% Magnetitpulver-Sand-Mischung. Einbettung 20 cm breit, 25 cm hoch; Eingrabetiefe 20 bzw. 45 cm

Es scheint praktisch gleichgültig zu sein, ob man mit einer Magnetitpulver-Schicht oder einem Gemisch arbeitet; der Verlauf beider Stoss widerstandskurven zeigt nur einen geringen Unterschied.

e. Kupferseil in Holzkohle

Die letzte Versuchsreihe sollte den Einfluss der Holzkohle auf den Stoss widerstand aufklären. Die Platzierung der Elektrode war analog wie bei denjenigen mit Magnetitpulver. Hier wurden fünf Variationen untersucht:

1. Größere Holzkohle in einer Schicht von $20 \times 1,5$ cm und in einer Tiefe von 25 cm;
2. dieselbe Anordnung, aber die Holzkohle feiner zerkleinert;
3. Holzkohlenstaub-Schicht von $40 \times 2,5$ cm, in einer Tiefe von 25 cm;
4. 23,5%ige Holzkohlenstaub-Sand-Mischung, 40×20 cm, 20 bzw. 45 cm tief eingegraben;
5. 15,5%ige Holzkohle-Sand-Mischung, 20×20 cm, die Holzkohlen fein zerkleinert, Eingrabetiefe 20 bzw. 45 cm.

Die Resultate dieser Versuche sind in der Tabelle VI zusammengestellt und in Fig. 8 dargestellt.

Wie es die Kurve 5 der Fig. 8 zeigt, ergibt die 15,5%ige Holzkohlenmischung den kleinsten Einfluss auf den Stoss widerstand. Als besser kann man die Kurve 1 bezeichnen. Die besten Resultate geben die Kurven 2...4. Diese 3 Variationen sind in ihrem Einfluss auf den Stoss widerstand gleichwertig; die drei Kurven fallen in eine Kurve zusammen.

Versuchsergebnisse bei horizontal in Holzkohle
eingebettetem Cu-Seil

Tabelle VI

Kurve	Art der Holzkohle	Masse des Gemisch- quer- schnittes cm	Nieder- fre- quenz- wider- stand Ω	Stoss- span- nung kV	Strom A	Stoss- wider- stand Ω
1	grob	$20 \times 1,5$	180	8,7	58,5	149,2
				17,3	128	135,2
				27,3	208	131
				36	314	114,8
				62	638	97,1
				73	705	103,6
			180	107,5	1317	81,5
2	fein	$20 \times 1,5$	175	9,5	68,4	139,5
				18,6	149,5	124,5
				34	308,5	110
				60	644	93,2
				129,5	2690	48,2
				153,5	2680	57
			175	153,5	2680	57
3	Staub	$20 \times 2,5$	190	9,15	65,9	139
				23,5	188,5	124,7
				33,6	307	109,5
				51,1	491	105
				125	2363	52,8
				130	1905	68,2
			190	130	1905	68,2
4	Kohlenstaub- und Sand- Mischung (23,5 Volumen-%)	40×20	165	16,7	135	123
				28,8	287	100,5
				53,7	511	104,6
				36,8	339	109
				118,5	2290	51,7
				142	2620	56,3
			160	142	2620	56,3
5	Feine Kohle mit Sand gemischt (15,5 Volumen-%)	20×20	200	11,2	72,6	154
				24,7	173	142,6
				37,2	293	127
				55,7	434	128
				67,2	674	99,6
				88	841	104,5
			200	167	2560	65,2

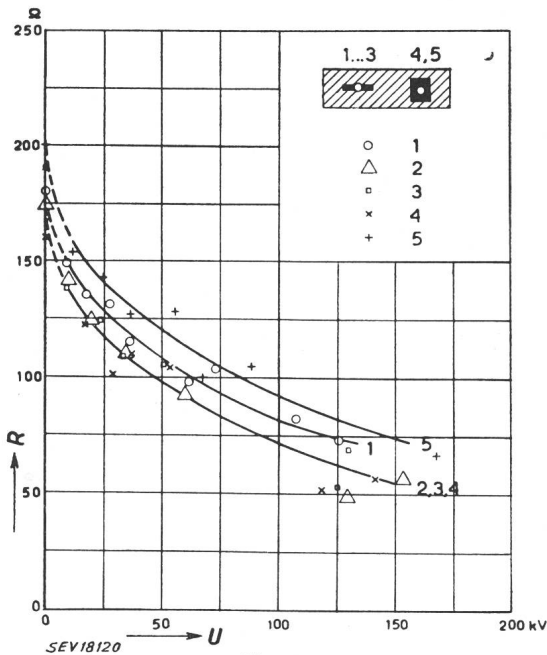


Fig. 8

- Stoss widerstandskurven des Kupferseiles in Holzkohle
- $20 \times 1,5$ cm Schicht, 25 cm tief eingegraben, Kohle grob
 - wie 1, aber Kohle fein
 - $20 \times 2,5$ cm Schicht, 25 cm tief eingegraben, Kohlenstaub
 - 23,5 % Kohlenstaub-Sand-Mischung. Einbettung 40×20 cm; Eingrabetiefe 20 bzw. 40 cm
 - 15,5 % Mischung von feiner Kohle mit Sand. Einbettung 20×20 cm; Eingrabetiefe 20 bzw. 40 cm

4. Auswertung der Messresultate

Die Versuche haben erwiesen, dass der Niederfrequenzwiderstand des schlechten Bodens ($\rho \approx 3000 \Omega$ m) gegen die Dichte des Sandes rings um die Erd-elektrode sehr empfindlich ist. Bei einer und derselben Elektrodenanordnung ändert sich der Niederfrequenzwiderstand von 245Ω (gestampfter Sand) bis 370Ω (loser Sand), also um 65%. Daraus kann man schliessen, dass der unmittelbar nach Einlegen

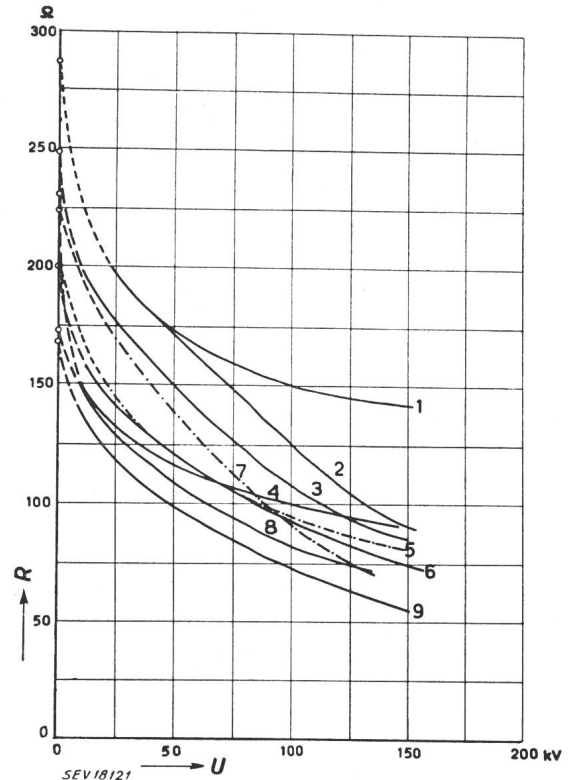


Fig. 9

Zusammenstellung der Stoss widerstandskurven

- 1, 2 Kupferseil in Sand 25 bzw. 60 cm tief eingegraben
- 3 Stacheldraht (5 cm Stachel) im Sand 60 cm tief eingegraben
- Kupferseil mit losen Stacheln (20 cm) im Sand 25 cm tief eingegraben
- 4 Kupferseil in $20 \times 1,5$ cm Magnetitpulverschicht 25 cm tief eingegraben
- 5 Stacheldraht mit 5 und 10 cm Stacheln 25 cm tief eingegraben
- 6 Kupferseil in Holzkohle-Sand-Mischung (fein) 20 bzw. 40 cm tief eingegraben
- 7 Stacheldraht (10 cm Stachel) im Sand 60 cm tief eingegraben
- 8 Kupferseil in $20 \times 1,5$ cm Holzkohlenschicht (grob) 25 cm tief eingegraben
- 9 Kupferseil in $40 \times 2,5$ cm Holzkohlenschicht (Kohlenstaub) 25 cm tief eingegraben
- Kupferseil in Holzkohlen-Sand-Mischung (Kohlenstaub) 20 bzw. 40 cm tief eingegraben
- Kupferseil in $20 \times 1,5$ cm Holzkohlenschicht (fein) 25 cm tief eingegraben

der Elektrode gemessene Niederfrequenzwiderstand ein unsicheres Kriterium für die Beurteilung der Erdung gibt. Nur nach einiger Zeit, wenn die aufgeschüttete Erde auf natürlichem Weg sich gesetzt hat, d. h. deren Zustand demjenigen des gewachsenen Bodens gleichkommt, kann der Niederfrequenzwiderstand zur Beurteilung der Erdung dienen. Bei den untersuchten 15 Elektrodeneinbettungen lag der Wert des Niederfrequenzwiderstandes zwischen 160Ω und 285Ω . Im weiteren ist es nicht gelungen, einen sicheren Zusammenhang zwischen

dem Niederfrequenz- und dem Stoss widerstand festzustellen, d. h. dem kleinsten Niederfrequenzwiderstandswert entspricht nicht der kleinste Stoss widerstandswert.

Die gemessenen Stoss widerstände der 15 Elektrodeneinbettungen sind von der Meßspannung abhängig, und zwar nehmen sie in der Regel mit wachsender Spannung ab. Es ergaben sich bei höheren Spannungen bedeutend niedrigere Widerstandswerte als bei niedrigen. Einen allgemeinen Überblick über die Verminderung des Stoss widerstandes gewinnt man aus Fig. 9, wo die Stoss widerstandskurven der verschiedenen Elektrodenanordnungen zusammengestellt sind. Die geringste Widerstandsabnahme ist bei glattem Seil in Sand und bei einer Eingrabetiefe von 25 cm (Kurve 1) festzustellen, und zwar beträgt der Stoss widerstand bei einer Spannung von 150 kV in diesem Fall 140 Ω . Der Einfluss der Eingrabetiefe der Erdelektrode ist aus dem Vergleich der Kurven 1 und 2 sichtbar: ein Seil, im Sand 25 cm tief eingegraben, hat bei 150 kV einen Stoss widerstand von 140 Ω , in 60 cm Tiefe nur noch 60 Ω . Bei dem Stacheldraht konnte man keinen so grossen Einfluss der Eingrabetiefe feststellen: die entsprechenden Werte sind 65 Ω gegen 80 Ω (Kurven 5 und 7). Was die beiden angewendeten Einbettungsmaterialien betrifft, so erwies sich, dass fein zerkleinerte Holzkohle oder Holzkohlenstaub den günstigsten Einfluss auf die Verminderung des Stoss widerstandes hatten (Kurve 9). Der Einfluss des Magnetitpulvers ist nur am Anfang der Kurve merklich, bei grösserer Spannung liegt der Stoss widerstandswert höher als beim Stacheldraht in Holzkohle (Kurve 4). Auf die Frage, welche Struktur des Einbettungsmaterials günstiger ist, ob man eine Schicht oder eine Mischung mit Sand verwenden soll, ist leicht eine Antwort zu finden. Kurve 9 der Fig. 9 zeigt, dass es keinen nennenswerten Unterschied zwischen diesen zwei Verwendungsarten des Einbettungsmaterials gibt. Die beiden Kurven (der Schicht und der Mischung) fallen zusammen.

Ein wichtiger Faktor ist die richtige Wahl des Einbettungsmaterials selbst. Richtig ausgewähltes Material begünstigt die Ausbildung des Durchschlaggebietes rings um die Elektrode, was einen kleineren Stoss widerstand zur Folge hat. Aus anderen Gründen soll das Einbettungsmaterial Eigenschaften besitzen, ohne welche es beim praktischen Gebrauch nicht verwendbar ist. Erstens soll es chemisch inaktiv sein, es soll die (verzinkten) Eisenmaste und Kupferelektroden nicht angreifen oder die Rolle eines Elektrolytes spielen und so lokale galvanische Elemente bilden. Das Material selbst soll beständig sein und mit anderen Elementen der Erde nicht Verbindungen bilden. Im weiteren soll das Material entweder gute, permanente Leitfähigkeit oder solche bei grösseren Gradienten bzw. Stromdichten besitzen. Von den untersuchten Materialien — Magnetitpulver und Holzkohle — ist das zweite dem ersten überlegen. Wie bei zusätz-

lichen Versuchen festgestellt wurde, besitzt das Magnetitpulver nur bei grossen Stromdichten gute Leitfähigkeit; darin liegt der Grund, dass in den Versuchen (bis 150 kV, 2000 A) die Holzkohle die besten Resultate erzielt hat. Das Magnetitpulver hat ausserdem grösseres spezifisches Gewicht (3,0) gegenüber der Kohle (0,3), was auch höhere Transportkosten bedeutet.

Wichtig ist ferner die Form der Erdelektroden. Die an der Elektrode angebrachten Spitzen erleichtern die Ausbildung eines lokalen Durchschlaggebietes und üben dadurch eine günstige Wirkung auf die Stoss widerstandsverminderung aus. Längere Stacheln und grössere Eingrabetiefe scheinen diesen Einfluss zu verstärken. Aus den durchgeführten Untersuchungen kann noch kein abschliessendes Bild über die zahlreichen Einflüsse auf den Stoss widerstand gewonnen und auch die Frage der günstigsten Erdelektrodenform bzw. -anordnung noch nicht voll abgeklärt werden. Es scheint jedoch, dass die Anordnung — glattes Seil in Holzkohlenstaub eingebettet — dem Stacheldraht ohne spezielles Einbettungsmaterial überlegen ist.

Literatur

- [1] Towne, H. M.: Lightning Arrester Grounds. Gen. Electr. Rev. Bd. 35(1932), Nr. 3, S. 173...177.
- [2] Norinder, H., und R. Nordell: Impulsmotståndet hos jordarter (Stoss widerstand bei verschiedenen Erdarten). Tekn. T. Bd. 67(1937), Nr. 27, Elektroteknik 7.
Norinder, H., und R. Nordell: Influence de la nature de la terre et de la disposition des électrodes sur la résistance des prises de terre aux courants d'impulsion. Conférence internationale des grands réseaux électriques (CIGRE), 10^e Session (1939), Bd. 3, Rapport 302.
- [3] Baatz, H.: Über den wirksamen Widerstand von Erdern bei Stossbeanspruchung. Elektrotechn. Z. Bd. 59(1938), Nr. 47, S. 1263...1267.
- [4] Bellaschi, P. L.: Impulse and 60-cycle characteristics of driven grounds. I, Trans". Amer. Inst. Electr. Engr". Bd. 60(1941), März, S. 123...127.
Bellaschi, P. L., R. E. Armington und A. E. Snowden: Impulse and 60-cycle characteristics of driven grounds. II, Trans". Amer. Inst. Electr. Engr". Bd. 61(1942), Juni, S. 349...363.
- [5] Davis, R., und J. E. M. Johnston: The surge characteristics of tower and tower-footing impedances. J. Instn. Electr. Engr". Bd. 88, Part II (1941), Nr. 5, S. 453...466.
- [6] Berger, K.: Das Verhalten von Erdungen unter hohen Stoßströmen. Bull. SEV Bd. 37(1946), Nr. 8, S. 197...211.
- [7] Norinder, H., und G. Petropoulos: Impulse characteristics of the ground under direct discharges and with pointed electrodes. Ark. Mat. Astr. Fys. Bd. 35A(1948), Nr. 26.
- [8] Petropoulos, G.: The high-voltage characteristics of earth resistances. J. Instn. Electr. Engr". Bd. 95, Part II(1948), S. 59.
- [9] Wenner, F.: A method of measuring earth resistivity. United States Bureau of Standards, Bull. 258.
- [10] Dwight, H. B.: Calculation of resistances to ground. Electr. Engng. Bd. 55(1936), S. 1319.

Adresse der Autoren:

Prof. Dr. Harald Norinder, Institut för Högspänningsforskning, Uppsala.
Dipl. Ing. Oskars Salka, Institut för Högspänningsforskning, Uppsala.