

Zeitschrift: Technische Mitteilungen / Schweizerische Post-, Telefon- und Telegrafienbetriebe = Bulletin technique / Entreprise des postes, téléphones et télégraphes suisses = Bollettino tecnico / Azienda delle poste, dei telefoni e dei telegrafi svizzeri

Herausgeber: Schweizerische Post-, Telefon- und Telegrafienbetriebe

Band: 36 (1958)

Heft: 3

Artikel: Korrosionsbeständigkeit verschiedener Kabeltypen : erster Zwischenbericht über den Grossversuch im Belpmoos = Résistance de divers types de câbles à la corrosion : premier rapport intermédiaire sur l'essai grand réalisé au Belpmoos

Autor: Vögtli, K. / Meister, H.

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-874419>

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: 15.03.2025

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

Korrosionsbeständigkeit verschiedener Kabeltypen

Erster Zwischenbericht über den Grossversuch im Belpmoos

Résistance de divers types de câbles à la corrosion

Premier rapport intermédiaire sur l'essai en grand réalisé au Belpmoos

621.315.221:620.193

Zusammenfassung. *Es wird über vorläufige Ergebnisse eines Grossversuchs zur Abklärung der Korrosionsbeständigkeit verschiedener Kabeltypen berichtet. Insbesondere zeigte es sich, dass ein Moorboden gegenüber Blei weit weniger aggressiv wirkt als ein Lehmboden und dass Kabel in Zoreskanälen schneller korrodieren als solche, die direkt in den Boden verlegt wurden. Ferner trat «Phenolkorrosion» an einem blanken Kabel auf, woraus geschlossen werden konnte, dass organisches Hüllmaterial keine notwendige Voraussetzung für diese Korrosionsart sein kann. Kathodischer Schutz erwies sich auch gegenüber «Phenolkorrosion» als wirksam, wobei selbst bei Polarisationsspannungen von -2 V gegenüber einer Kupfer/Kupfersulfatelektrode keinerlei Spuren einer kathodischen Korrosion auftraten. Das oft benützte Spannungskriterium Bleimantel-Kupfer/Kupfersulfatelektrode von $-0,55\text{ V}$ erwies sich als unzuverlässig, indem Kabelmäntel mit deutlich niedrigerem Potential trotzdem korrodierten.*

1. Einleitung

Korrosionsschäden an Telephonkabeln entstehen nur in ganz seltenen Ausnahmefällen innert Tagen oder Wochen. Im allgemeinen sind es vielmehr sehr langsam ablaufende Vorgänge, die erst nach Jahren oder Jahrzehnten ein Kabel dermassen verändern, dass dieses seine Funktionen nicht mehr erfüllen kann. Man wird daher versuchen, durch verschärfte Bedingungen im Laboratorium die Korrosionsgeschwindigkeit so weit zu steigern, dass innerhalb nützlicher Frist Resultate gewonnen werden können, die es ermöglichen, die Korrosionseigenschaften der Kabel zu verbessern.

Im Laborbetrieb können indessen unmöglich alle Umstände berücksichtigt werden, die bei der natürlichen Korrosion auftreten. Man wird daher eine Auslese von einigen wenigen Faktoren treffen, von denen man annimmt, dass sie, wenn auch nicht ausschliesslich, so doch zur Hauptsache das korrosive Geschehen bestimmen. Damit werden aber grundsätzlich die Ergebnisse solcher Modellversuche fragwürdig, denn die Auslese von einigen Faktoren aus einer grossen Zahl schliesst möglicherweise eine Täuschung in sich, oder einige wenige Parameter können gar kein Bild der Wirklichkeit geben, da unter natürlichen Bedingungen eine Vielzahl gleichwertiger und nicht nur einige dominierende Faktoren die Korrosionsverhältnisse bestimmen. Somit bedürfen Massnahmen, die auf Grund von Modellversuchen im Laboratorium getroffen werden, immer einer Bestätigung durch die Praxis.

Résumé. *Les auteurs rapportent sur les résultats provisoires d'un essai en grand destiné à déterminer la résistance de divers types de câbles à la corrosion. Il s'est en particulier révélé qu'un sol marécageux agit sur le plomb avec beaucoup moins d'agressivité qu'un terrain argileux et que les câbles placés dans des caniveaux en fer zorès se corrodent plus rapidement que ceux qui sont directement enfouis dans le sol. En outre, la corrosion dite du «phénol» est apparue sur un câble nu, d'où il a été possible de conclure que les enveloppes en matière organique ne constituent pas une condition sine qua non pour ce genre de corrosion. La protection cathodique s'est également révélée efficace contre la corrosion dite du «phénol», aucune trace de corrosion cathodique n'étant apparue même aux potentiels de polarisation de -2 V contre une électrode de cuivre/sulfate de cuivre. Le critère de tension souvent utilisé gaine de plomb - électrode de cuivre/sulfate de cuivre de $-0,55\text{ V}$ s'est révélé très peu sûr, les gaines de câble se corrodant avec un potentiel nettement inférieur.*

1. Introduction

Les dommages provoqués par la corrosion sur les câbles téléphoniques ne se produisent que dans des cas extrêmement rares en l'espace de quelques jours ou de quelques semaines. Règle générale, les processus sont très longs et ne modifient qu'après des années ou des dizaines d'années la structure d'un câble au point que ce dernier ne puisse plus remplir sa fonction. C'est pourquoi on s'efforce d'accélérer, en laboratoire, par des conditions plus sévères, la vitesse de corrosion, de façon à obtenir dans un délai utile des résultats permettant d'améliorer les caractéristiques des câbles pour lutter contre la corrosion.

En laboratoire, il n'est cependant pas possible de tenir compte de toutes les circonstances qui se présentent pour la corrosion naturelle. C'est pourquoi on choisit un petit nombre de facteurs dont on admet qu'ils détermineront sinon exclusivement, du moins en majeure partie le phénomène de la corrosion. Mais les résultats de ces essais types sont, de ce fait, douteux, car le fait de choisir quelques facteurs parmi un grand nombre peut comporter une erreur, ou encore un petit nombre de paramètres peuvent ne pas donner du tout l'image de la réalité, étant donné qu'un grand nombre de facteurs équivalents et non pas quelques facteurs dominants déterminent les circonstances de la corrosion dans les conditions naturelles. Ainsi, les mesures prises sur la base d'essais types effectués en laboratoire doivent toujours être confirmées par la pratique.

Es ist indessen im praktischen Betrieb oft schwierig abzuschätzen, wie wirksam eine frisch eingeführte Massnahme ist, weil keinerlei Vergleichsmöglichkeiten bestehen. Wird zum Beispiel ein korrodiertes Kabel durch ein neues mit angeblich besseren Eigenschaften ersetzt, so ist nur das negative Ergebnis einer erneuten Korrosion eindeutig, während ein störungsfreier Betrieb auch auf Änderungen der Umwelt (weniger Wasser im Zoreskanal, keine aggressiven Stoffe mehr, andere Biozönosen usw.) zurückgeführt werden kann. In solchen Fällen erlaubt erst die statistische Auswertung vieler ähnlicher Begebenheiten ein schlüssiges Urteil. Um jedoch ein genügend grosses, statistisch verwertbares Material zu schaffen, muss mit einem gewissen Risiko eine Neuerung in grossem Maßstab eingeführt werden. Dieses Risiko kann nun aber durch Versuche unter natürlichen Bedingungen vermindert werden, wenn zu Versuchszwecken das zu vergleichende Material – zum Beispiel zwei oder mehrere Kabeltypen – gleichzeitig denselben Bedingungen ausgesetzt werden. Dann besteht auch bei günstigem Verhalten eines neuen Produkts keinerlei Unsicherheit über die Korrosivität der Umgebung, da diese am Zustand des ebenfalls vorhandenen alten Produkts nachgeprüft werden kann. So wurde seinerzeit die Anlage «Belpmoos» erstellt [1], wobei gleichzeitig verschiedene Kabeltypen, verschiedene Arten der Verlegung sowie kathodisch bzw. anodisch belastete Kabel ins Versuchsprogramm aufgenommen wurden.

2. Das Versuchsgelände

Als Versuchsgelände wurde der ebene Talboden des Gürbetals zwischen Belp und Toffen gewählt, weil dort die Ebene gegen den rechten Hang zu von Moorboden gebildet wird, während die Talmitte schwere Lehmböden aufweist.

Dadurch, dass die Kabel quer zur Talrichtung verlegt wurden, konnte man erwarten, dass sich eine sogenannte geologische Kette bilden würde, indem die Teile der Kabel, die in Moorboden zu liegen kamen, ein anderes Potential annehmen würden als die Kabelabschnitte im Lehmboden. Ferner konnte damit gerechnet werden, dass die chemische Aggressivität der beiden Böden stark verschieden wäre. Der Moorboden gilt allgemein als korrosiv, während Lehmböden gewöhnlich als harmlos angesehen werden. Bodenuntersuchungen ergaben für den Moorboden den schwach sauren pH-Wert 6; ferner wurden in ihm viel austauschfähige Säure und ungesättigte Humusstoffe festgestellt. Der gelbgraue Lehmboden dagegen reagiert neutral, enthält nur wenig Austauschsäuren, ist humusarm und weist einen geringen Kalkgehalt (1,4%) auf.

Es wird im folgenden noch darüber berichtet, dass sich der Moorboden gegenüber dem Kabelblei als völlig ungefährlich erwies, während der «harmlose» Lehmboden deutliche Korrosionen bewirkte.

En pratique, il est souvent difficile d'estimer l'efficacité d'une nouvelle mesure, du fait qu'il n'existe aucune possibilité de comparaison. Si, par exemple, on remplace un câble corrodé par un nouveau câble qu'on prétend avoir des caractéristiques nettement meilleures, seul le résultat négatif d'une corrosion répétée est significatif, tandis qu'un service sans perturbation peut aussi être dû aux modifications du voisinage (moins d'eau dans le caniveau zorès, plus aucun produit agressif, autres biocénoses, etc.). En pareils cas, l'évaluation statistique de nombreux faits analogues permet seule de porter un jugement définitif. Pour obtenir un matériel assez important pouvant être évalué par la statistique, il faut courir un certain risque en innovant sur une grande échelle. Mais ce risque peut être diminué par des essais réalisés dans des conditions naturelles, si le matériel à comparer – par exemple deux ou plusieurs types de câbles – est simultanément soumis aux mêmes conditions. En ce cas, même lorsqu'un nouveau produit se comporte bien, il n'existe aucune incertitude sur la corrosivité de l'entourage, étant donné que cette dernière peut être vérifiée d'après l'état de l'ancien produit. C'est ainsi qu'on a établi à l'époque l'installation «Belpmoos» [1], en englobant dans le programme des essais simultanément différents types de câbles, divers genres de pose, ainsi que des câbles à charge cathodique, respectivement anodique.

2. Terrain d'essai

Comme terrain d'essai, on a choisi la plaine de la vallée de la Gürbe entre Belp et Toffen, qui est constituée par un sol marécageux du côté de la pente de droite, tandis que le milieu de la vallée offre des terrains argileux lourds.

Les câbles ayant été posés au travers de la vallée, on pouvait escompter qu'il se formerait une chaîne dite géologique: les tronçons des câbles posés dans le sol marécageux accuseraient un potentiel différent de celui des tronçons de câbles tirés dans le terrain argileux. En outre, on pouvait compter que l'agressivité des deux sols serait très différente. Le sol marécageux passe généralement pour être corrosif, tandis que le terrain argileux est ordinairement considéré comme inoffensif. Des analyses du sol ont donné pour le sol marécageux la faible valeur pH acide de 6; de plus, elles ont permis de constater qu'il contenait de nombreux acides susceptibles d'être transformés et des produits humiques non saturés. En revanche, le terrain argileux gris jaune a des réactions neutres, ne contient que peu d'acide d'échange, est pauvre en humus et a une faible teneur en chaux (1,4%).

Nous reviendrons plus loin sur le fait que le sol marécageux s'est révélé absolument inoffensif à l'égard du plomb des câbles, tandis que le terrain argileux «inoffensif» a provoqué des corrosions très nettes.

3. Der Aufbau der verschiedenen Kabeltypen

Von den folgenden Kabeltypen wurden die unter 1...6. und 9. angeführten im Oktober 1951, die unter 7. und 8. erwähnten, im April 1952 verlegt.

1. Kabel vom Typ B mit einer Bitumenschicht auf dem Bleimantel (Reinblei oder legiertes Blei mit 0,7% Antimon), drei bituminierten Papierbändern und einer Lage bituminiertes Jute als äusserste Schutzschicht.
2. Kabel vom Typ B mit erhöhtem Phenolgehalt zur Abklärung der Wirkung des Phenols. Bei diesem Kabel wurde ein stark phenolhaltiges Teerprodukt (0,3% Phenol) direkt auf den Reinbleimantel gegossen. Dann folgten drei Papierbänder, die nicht imprägniert wurden, wie dies sonst normalerweise der Fall ist. Erst wieder die Rohjutelage wurde nochmals mit dem erwähnten Teerprodukt übergossen, so dass in diesem Fall die Kabelhülle äusserst mangelhaft imprägniert ist.
3. Bandarmiertes Kabel (Typ C). Über den beiden bituminierten Eisenbändern ist nochmals eine mit Bitumen imprägnierte Jutelage gewickelt, während der Aufbau des Kabels unter der Armatur dem Typ B entspricht.
4. «Sandwich»-Kabel. Bei diesem Kabeltyp ist die Kabelhülle aus verschiedenen, imprägnierten Textilbändern aufgebaut, die nach aussen durch eine Jutelage gegen mechanische Verletzungen geschützt sind.
5. Kabel mit Polyäthylenband-Umwicklung. Der Bleimantel ist bei diesem Typ zunächst mit einem gummierten Baumwollband umwickelt, dann folgt eine Wicklung mit verschweisstem Polyäthylenband, ferner 4 Papierbänder, von denen die äusseren drei bituminiert sind sowie eine bituminierte Jutelage.
6. Kabel mit gespritztem Polyäthylenmantel. Der Kunststoffschutz ist ohne Zwischenschicht direkt auf den Bleimantel gespritzt und durch eine Lage nicht bituminiertes Jute gegen mechanische Verletzungen geschützt.
7. Bleimantel mit Polymentschutz-Hackethal. Der Polymentschutz auf dem Bleimantel wird durch eine aluminiumkaschierte Kunststoffolie von den imprägnierten Papierlagen getrennt. Das Kabel ist runddrahtarmiert und besitzt zuäusserst eine imprägnierte Juteschicht.
8. Stahlwellkabel mit Polymentschutz-Hackethal. Dieses Kabel ist bandarmiert und weist an Stelle des Bleimantels ein zur besseren Biegsamkeit gewelltes Rohr aus dünnem Stahlblech auf. Sonst ist der Korrosionsschutz ähnlich aufgebaut wie beim Bleikabel mit Polymentschutz.
9. Blankes Kabel mit Reinbleimantel, ohne irgendwelchen Korrosionsschutz.

3. Composition des différents types de câbles

Les types de câbles 1...6 et 9 ont été posés en octobre 1951, les types 7 et 8 en avril 1952:

1. Câble du type B avec une couche de bitume sur la gaine de plomb (plomb pur ou plomb allié à 0,7% d'antimoine), trois rubans de papier bitumé et une couche de jute bitumé servant de couche protectrice extérieure.
2. Câble du type B avec teneur plus élevée en phénol pour étudier l'effet du phénol. Pour ce câble, on a directement coulé sur la gaine de plomb pur un produit de goudron à forte teneur en phénol (0,3% de phénol). Ensuite, on a enroulé trois rubans de papier non imprégné, alors que généralement le papier est imprégné. Ce n'est que sur la couche de jute brut qu'on a à nouveau coulé le produit de goudron, de sorte que, dans ce cas, l'enveloppe du câble est imprégnée de façon extrêmement défectueuse.
3. Câble armé de feuillard (type C). On a encore enroulé une couche de jute imprégné de bitume par-dessus les deux rubans de fer bitumés, tandis que la structure du câble sous l'armure correspond à celle du câble du type B.
4. Câble «Sandwich». Pour ce type de câble, l'enveloppe du câble est composée de différents rubans de textile imprégnés, qui sont protégés vers l'extérieur contre les endommagements mécaniques par une couche de jute.
5. Câble à enveloppe de polyéthylène. La gaine de plomb de ce type de câble est d'abord enrobée d'un ruban de coton gommé, puis d'un ruban de polyéthylène soudé et de 4 rubans de papier dont les 3 rubans extérieurs sont bitumés, ainsi que d'une couche de jute bitumé.
6. Câble à gaine de polyéthylène extrudé. La protection en matière synthétique est directement boudinée sur la gaine de plomb sans couche intermédiaire et protégée contre les endommagements mécaniques par une couche de jute non bitumé.
7. Gaine de plomb avec enveloppe de polyment Hackethal. L'enveloppe de polyment sur la gaine de plomb est séparée des couches de papier imprégnées par une feuille en matière synthétique renforcée d'aluminium. Le câble est armé de fils ronds et possède une couche de jute imprégnée à l'extérieur.
8. Câble en tôle d'acier ondulée à enveloppe de polyment Hackethal. Ce câble est armé de feuillard et possède en lieu et place de la gaine de plomb un tube en fine tôle d'acier ondulée offrant une meilleure flexibilité. Autrement, la protection contre la corrosion est semblable à celle du câble sous plomb avec enveloppe de polyment.
9. Câble nu à gaine de plomb pur, sans aucune protection contre la corrosion.

4. Art der Verlegung und Versuchsanordnung

Es laufen zwei Versuchsserien, die eine mit Kabeln, die nach der Verlegung nicht mehr weiter beeinflusst wurden, und eine zweite, bei der die Kabel kathodisch geschützt, bzw. anodisch belastet sind. Beim Versuch zur Abklärung der korrosiven Eigenschaften der verschiedenen Kabeltypen in einem streustromfreien aber heterogenen und wahrscheinlich korrosiven Boden wurden, wie bereits im Abschnitt 2 erwähnt, die 200 m langen Versuchskabel derart verlegt, dass sie teils in Moorboden, teils in Lehmboden zu liegen kamen. In fünf direkt nebeneinanderliegenden Zoreskanälen (bituminierte Eisenkanäle, die aus 6 m langen Stücken mit Ω -förmigem Querschnitt zusammengeklammert sind), wurden folgende Kabel verlegt:

Kabel mit gespritztem Polyäthylenmantel (H)*	} Zoreskanal I
Kabel mit Polyäthylenbandwicklung (I)*	
«Sandwich»-Kabel (K)*	
Kabel mit erhöhtem Phenolgehalt (Typ B) (G)*	} Zoreskanal II
Kabel Typ B mit Reinbleimantel (E)*	} Zoreskanal III
Kabel Typ B mit antimonlegiertem Bleimantel (0,7% Sb) (F)*	
Kabel ohne Korrosionsschutz mit blankem Reinbleimantel (C)*	} Zoreskanal IV
Bleikabel mit Polymentschutz-Hackethal (M)*	} Zoreskanal V
Stahlwellkabel mit Polymentschutz-Hackethal (L)*	

Ausserdem wurden direkt in den Boden verlegt: ein Kabel Typ C mit Eisenbandarmatur (B)*, ein Kabel Typ B mit Reinbleimantel (D)*.

Ferner wurde ein Kabel vom Typ B mit einer Lehmschicht umgeben und dann ohne weiteren Schutz zugedeckt (Versuchskabel A*). Diese etwas seltsam scheinende Verlegungsart wurde in das Versuchsprogramm einbezogen, weil ein Kabel nach mehr als 50 Jahren praktisch fabrikneu aus einer Lehmschicht herausgenommen werden konnte, in die es zu einer Zeit, als noch keine allgemeinen verbindlichen Vorschriften über die Verlegung von Bleikabeln existierten, eingebettet worden war.

Für Versuche mit kathodisch geschützten Kabeln wurden im Lehmgebiet zwei 200 m lange Zoreskanäle verlegt, von denen einer ein Kabel Typ B mit Reinbleimantel und normaler bituminiertes Kabelhülle (A_k) und der andere ein Kabel gleichen Typs jedoch mit erhöhtem Phenolgehalt (B_k) enthält. Als Anoden dienen fünf neben den Zoreskanälen verlegte Bleirohre (Aussendurchmesser 24 mm, Wandstärke 2 mm) mit Längen von 10, 20,

* Die Versuchskabel wurden mit den Buchstaben A...M bezeichnet (vgl. [1] Fig. 33).

4. Genre de pose et organisation des essais

Deux séries d'essais ont été organisées: la première avec des câbles qui, après avoir été posés, n'ont plus subi d'autre influence, et la seconde, dans laquelle les câbles ont été protégés cathodiquement, respectivement chargés anodiquement. Lors de l'essai fait en vue de déterminer les propriétés corrosives des différents types de câbles dans un terrain sans courant vagabond, mais hétérogène et probablement corrosif, les câbles d'essai de 200 m de long ont été posés, ainsi que nous l'avons déjà dit au paragraphe 2, de telle sorte qu'ils se trouvent en partie dans le sol marécageux et en partie dans le terrain argileux. Cinq caniveaux en fer zorès placés directement les uns à côté des autres (caniveaux en fer bitumé composés de pièces de 6 m de long à section en forme de Ω) ont reçu les câbles suivants:

Câble avec gaine de polyéthylène extrudé (H)*	} Caniveau zorès I
Câble entouré d'un ruban de polyéthylène (I)*	
Câble «Sandwich» (K)*	
Câble avec teneur en phénol plus élevée (type B) (G)*	} Caniveau zorès II
Câble type B avec gaine de plomb pur (E)*	} Caniveau zorès III
Câble type B avec gaine de plomb à alliage d'antimoine (0,7% Sb) (F)*	
Câble sans protection contre la corrosion avec gaine de plomb nue (C)*	} Caniveau zorès IV
Câble sous plomb avec enveloppe de polyment Hackethal (M)*	} Caniveau zorès V
Câble sous tôle d'acier ondulée avec enveloppe de polyment Hackethal (L)*	

En outre, ont été posés directement dans le sol: un câble type C avec armure de fer feuillard (B)*, un câble type B avec gaine de plomb pur (D)*.

De plus, un câble du type B a été enrobé d'argile et recouvert sans autre protection (câble d'essai A)*. Ce genre de pose, qui paraît assez singulier, a été inclus dans le programme des essais, parce qu'un câble a pu être retiré pratiquement à l'état de neuf, après plus de 50 ans, d'une couche d'argile dans laquelle il avait été placé à une époque où il n'existait encore aucune prescription de portée générale sur la pose de câbles sous plomb.

Pour les essais avec les câbles à protection cathodique, on a posé dans la zone argileuse deux caniveaux zorès de 200 mètres de long, dont l'un renferme un câble type B à gaine de plomb pur et enveloppe de câble normale bitumée (A_k) et l'autre un câble de même type, mais avec teneur plus grande en phénol (B_k). Servent d'anode cinq tubes de plomb (diamètre extérieur: 24 mm, épaisseur des parois: 2 mm) de 10, 20, 40, 60 et 70 mètres de long, posés dans le voisinage des caniveaux zorès. Chaque anode est

* Les câbles d'essai ont été désignés par les lettres A...M (voir [1] figure 33).

40, 60 und 70 m. Jede Anode ist mit einem polyäthylenisolierten Draht mit dem Speisegleichrichter verbunden, der in einem Blechkasten an einer Stange montiert ist [1]. Der Kasten enthält auch die Endverschlüsse der beiden Kabel. Die Strombelastung der als Gegenelektroden für die kathodisch geschützten Kabel dienenden Anoden kann mit Widerständen einzeln für jede Länge eingestellt werden.

Während einiger Zeit wurden parallel zu den Bleirohr-Anoden Stücke verschiedener Kabeltypen geschaltet, um an ihnen allfällige elektrolytische Korrosionen verfolgen zu können. Eine Beeinflussung des Versuchs mit den unbelasteten Kabeln wurde durch einen genügend grossen Abstand (150 m) vermieden.

5. Die elektrische Überwachung der Versuchskabel

Es wurden folgende Vorkehren getroffen, um das Verhalten der Kabel während des Versuchs durch periodische Messungen überwachen zu können:

- a) Die Kabel wurden voneinander elektrisch isoliert, d. h. zwischen den Kabeln bestehen keine metallischen Verbindungen. Deshalb können zwischen Kabeln mit unterschiedlichem Potential keine Ausgleichsströme fließen, die die Versuchsergebnisse beeinflussen würden.
- b) Von jedem Kabel ist das eine Ende zugänglich, so dass dort der Erdungswiderstand des Kabelmantels und dessen Potential gemessen werden können. Ferner sind 50, 100 und 150 m vom Abschlusskasten entfernt je zwei Adern in einem Abstand von 10 m (also bei 45 und 55 m Distanz usw.) auf den Bleimantel gelötet worden, so dass der Spannungsabfall auf dem Mantel und damit indirekt der Mantelstrom gemessen werden können. Diese Anschlüsse wurden auch bei drei Kabeln mit praktisch wasserdichten Spezialumhüllungen («Sandwich»-Kabel, Kabel mit Polyäthylenbandwicklung und Kabel mit gespritztem Polyäthylenmantel) hergestellt. Eine einwandfrei dichtende Reparatur der aufgeschnittenen Hüllen war aber bei diesen Typen kaum mehr zu bewerkstelligen, so dass die Ergebnisse der Erdwiderstandsmessungen bei diesen Kabeln unsicher sind. Die relativ niedrigen Werte sind sehr wahrscheinlich durch undichte Flickstellen bedingt.
- c) Die Adern, die nicht für die Messung der Mantelströme vorgesehen sind, wurden isoliert herausgeführt, so dass ihre Isolationswerte eine allfällige Perforation des Bleimantels infolge Korrosion sofort erkennen lassen, weil die Isolation der eindringenden Feuchtigkeit wegen sehr stark absinkt.
- d) Die Polarisationsströme der kathodisch belasteten Kabel sowie der Anoden können am Speisegleichrichter einzeln gemessen werden.

relié par un fil à isolation de polyéthylène au redresseur d'alimentation monté dans une armoire en tôle fixée à un poteau [1]. L'armoire contient également les boîtes de fin des deux câbles. La charge de courant des anodes servant de contre-électrodes pour les câbles protégés cathodiquement peut être réglée au moyen de résistances séparément pour chaque longueur.

Pendant quelque temps, on a connecté en parallèle avec les anodes en tube de plomb, des tronçons de divers types de câbles, pour pouvoir suivre sur ces derniers les progrès des corrosions électrolytiques éventuelles.

Pour éviter que les câbles non chargés ne soient influencés, on a choisi une distance assez grande (150 mètres).

5. Surveillance électrique des câbles à l'essai

Nous avons pris les mesures suivantes pour pouvoir surveiller par des mesures périodiques le comportement des câbles durant les essais:

- a) Les câbles ont été isolés électriquement les uns des autres, c'est-à-dire qu'il n'existait aucune liaison métallique entre eux. C'est pourquoi il était impossible que des courants de compensation, qui eussent pu influencer les résultats des mesures, circulassent entre les câbles ayant un potentiel différent.
- b) L'une des extrémités de chaque câble est accessible, de sorte qu'on peut mesurer la résistance de mise à la terre de la gaine du câble et son potentiel. En outre, à 50, 100 et 150 mètres de l'armoire terminale, deux conducteurs ont été soudés à une distance de 10 mètres (soit à 45 et 55 mètres de distance, etc.) sur la gaine de plomb, de sorte que la chute de tension sur la gaine de plomb et indirectement le courant circulant dans la gaine peuvent être mesurés. Ces liaisons ont aussi été établies sur trois câbles à enveloppes spéciales, pratiquement étanches (câble «Sandwich», câble enrobé d'un ruban de polyéthylène et câble avec gaine de polyéthylène extrudé). Il fut presque impossible de réparer de façon tout à fait étanche les gaines coupées de ces types de câbles, si bien que les résultats des mesures de résistance contre la terre sont incertains. Les valeurs relativement basses sont très probablement dues aux réparations non étanches.
- c) Les conducteurs, non prévus pour la mesure des courants de gaine, ont été isolés, de sorte que leurs valeurs d'isolement permettent de reconnaître immédiatement une perforation éventuelle de la gaine de plomb par suite de la corrosion, du fait que l'humidité qui pénètre fait diminuer l'isolement.
- d) Les courants de polarisation des câbles à charge cathodique ainsi que des anodes peuvent être mesurés séparément au redresseur d'alimentation.

6. Messergebnisse

a) Erdungswiderstände der Kabel

Der Widerstand der Kabel gegen Erde gibt ein gutes Mass für die Porosität der Kabelumhüllungen. Um für den Einfluss der Umhüllungen einen Vergleichswert zu haben, sei bemerkt, dass ein 200 m langes Kabel ($6 \times 2 \times 0,6$), das nackt im Boden des Versuchsgeländes, dessen spezifischer Widerstand $25 \Omega\text{m}$ beträgt, verlegt worden wäre, einen Erdungswiderstand von $0,55 \Omega$ hätte. Die Ableitung ist in einem solchen Fall bereits so gross, dass die Dämpfung eines Gleichstromes auf 200 m annähernd 2 N beträgt, so dass bei einem blank verlegten Bleikabel die Verhältnisse am Kabelende keinen grossen Einfluss mehr auf diejenigen am Kabelanfang ausüben. Obschon die normale Papier-Jute-Isolation nur einen mangelhaften Abschluss des Kabelmantels gegen die Umgebung darstellt, so unterscheiden sich doch die Kabel vom Typ B und C stark vom blank verlegten.

Zu Beginn des Versuches, das heisst etwa eine Woche nach Verlegung der Kabel, unterschieden sich die Erdungswiderstände der einzelnen Typen noch beträchtlich (vgl. Fig. 1). Am höchsten (von den Kabeln mit traditioneller Umhüllung) lag der Wert des bandarmierten Kabels (Versuchskabel B) mit 1500Ω , dann folgten die Kabel Typ B mit Reinbleimantel und normaler Umhüllung (Versuchskabel D und E) mit Werten zwischen 75 und 130Ω , wobei

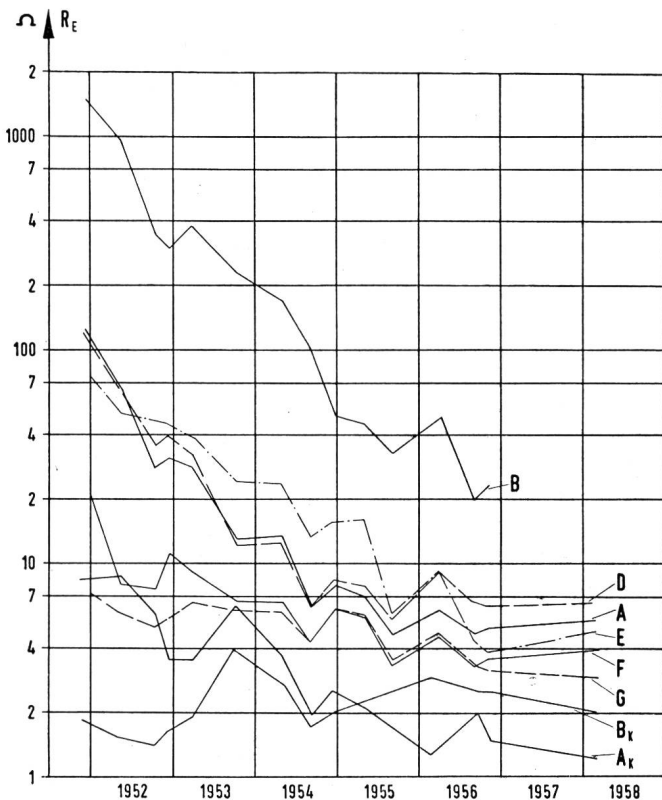


Fig. 1. Erdungswiderstände der Kabel mit Juteumhüllung. Die Kabel sind mit den im Text verwendeten Buchstaben bezeichnet (vgl. S. 112)

Résistances de mise à la terre des câbles avec enveloppe de jute. Les câbles sont désignés par les lettres utilisées dans le texte. Voir page 112

6. Résultats des mesures

a) Résistance de mise à la terre des câbles

La résistance des câbles contre la terre donne une bonne idée de la porosité des enveloppes. Pour avoir une valeur de comparaison pour l'influence des enveloppes, il y a lieu de noter que si un câble de 200 mètres de long ($6 \times 2 \times 0,6$) avait été posé à nu dans le sol du terrain d'essai, dont la résistance spécifique est de 25 ohms-mètres , il aurait une résistance de mise à la terre de $0,55 \text{ ohm}$. La perte est, en pareil cas, déjà si grande que l'atténuation d'un courant continu est à peu près de 2 N à 200 mètres, de sorte que, pour un câble sous plomb posé à nu, les conditions à l'extrémité du câble n'exercent plus une grande influence sur celles qui régnaient à son début. Bien que l'isolation normale en papier et en jute ne représente qu'une protection défectueuse de la gaine de câble contre l'entourage, les câbles du type B et du type C se différencient néanmoins énormément du câble posé à nu.

Au début de l'essai, c'est-à-dire une semaine environ après que les câbles eurent été posés, les résistances de mise à la terre des différents types se différencient encore considérablement (voir fig. 1). La valeur du câble armé de feuillard (câble à l'essai B) était la plus élevée (des câbles avec enveloppe traditionnelle) avec 1500 ohms , puis suivaient les câbles du type B avec gaine de plomb pur (câbles à l'essai D et E) et gaine normale avec des valeurs oscillant entre 75 et 130 ohms . Des valeurs assez basses ($7 \dots 21 \text{ ohms}$) ont été enregistrées pour le câble type B (câble à l'essai F) avec alliage d'antimoine, le câble avec teneur plus grande en phénol (câble à l'essai G), ainsi que pour les câbles avec protection cathodique (câbles à l'essai A_K et B_K), parmi lesquels le câble à teneur plus grande en phénol (B_K) qui, ainsi que nous l'avons fait remarquer, avait été imprégné de façon très défectueuse, n'indiquait même que $1,8 \text{ ohm}$.

Avec le temps, les résistances de mise à la terre diminuèrent encore considérablement, ainsi que l'on s'y attendait, de sorte que, après 5 ans, le câble armé de feuillard (câble à l'essai B) n'avait plus qu'une résistance de 20 ohms – bien que l'armure de fer n'eût pas été reliée au plomb contrairement à la pratique de pose normale – et toutes les autres valeurs variaient entre $1,5$ et 6 ohms .

Le graphique n'indique pas les valeurs de résistance du câble nu (câble à l'essai C), posé dans un caniveau zorès, dont la résistance de mise à la terre se compose de la somme des résistances de contact avec le caniveau zorès et de sa résistance de propagation. C'est pourquoi les variations n'étaient que faibles; toutes les valeurs de mesure varient entre $0,6$ et 1 ohm .

La figure 2 montre la courbe des résistances de mise à la terre des câbles à enveloppe spéciale. Après cinq ans, les différences ne sont plus grandes; toutes les résistances sont de l'ordre de $300 \dots 1000 \text{ ohms}$. Ainsi que nous l'avons déjà dit, les enveloppes de trois câbles

die Art der Verlegung keinen Einfluss hatte. Relativ tiefe Werte (7...21 Ω) wurden beim antimonlegierten Kabel Typ B (Versuchskabel F), dem Kabel mit erhöhtem Phenolgehalt (Versuchskabel G) sowie bei den kathodisch geschützten Kabeln (Versuchskabel A_k und B_k) gemessen, von denen dasjenige mit erhöhtem Phenolgehalt (B_k), das wie bemerkt, sehr mangelhaft imprägniert wurde, sogar nur 1,8 Ω ergab.

Mit der Zeit sanken die Erdungswiderstände erwartungsgemäss noch beträchtlich, so dass nach 5 Jahren das bandarmierte Kabel (Versuchskabel B) nur noch einen Widerstand von 20 Ω aufwies – obwohl die Eisenarmatur entgegen der normalen Verlegungspraxis nicht mit dem Blei verbunden worden war – und alle übrigen Werte zwischen 1,5 und 6 Ω lagen.

Nicht aufgetragen in der graphischen Darstellung sind die Widerstandswerte für das blanke, in einem Zoreskanal verlegte Kabel (Versuchskabel C), dessen Erdungswiderstand sich aus der Summe der Kontaktwiderstände mit dem Zoreskanal und dessen Ausbreitungswiderstand zusammensetzt. Die Schwankungen waren daher nur gering; alle Messwerte liegen zwischen 0,6 und 1 Ω .

Figur 2 zeigt den zeitlichen Verlauf der Erdungswiderstände der Kabel mit Spezialumhüllungen. Nach fünf Jahren sind die Unterschiede nicht mehr gross; alle Widerstände liegen im Bereich 300...1000 Ω . Wie bereits erwähnt, wurden die Umhüllungen von drei Kabeln verletzt, als die Adern zur Messung der Mantelströme auf die Bleimäntel gelötet wurden. Daher sind die Werte für das «Sandwich»-Kabel (Versuchskabel K), das Kabel mit Polyäthylenumwicklung (Versuchskabel I) und dasjenige mit einem gespritzten Polyäthylenschutz (Versuchskabel H) nicht repräsentativ.

b) Potentiale

Das Potential der Kabel wurde periodisch mit Hilfe eines Röhrenvoltmeters und einer $Cu/CuSO_4$ ges.-Sonde gemessen. Wie Figur 3 zeigt, liegt ein einziger Messpunkt ausserhalb des sogenannten «Schutzpotentials» [2] von -0,55 V; alle andern Werte liegen im «geschützten» Bereich. Dabei ist zu bedenken, dass das Potential der armierten oder in den eisernen Zoreskanälen liegenden Kabel zweifelsohne vom Eisen beeinflusst wird.

Auf die Darstellung der Potentialverläufe der Kabel mit Spezialumhüllungen wurde verzichtet, da sie sich von den andern kaum unterscheiden.

c) Mantelströme

Messbare Mantelströme flossen einzig beim blank in einem Zoreskanal verlegten Kabel. Sie betragen maximal 10 mA. Wie im nachfolgenden Abschnitt ausgeführt wird, waren diese Ausgleichsströme des mit dem Zoreskanal in metallischer Verbindung stehenden Kabels nicht die Ursache der aufgetretenen Korrosionen. Die übrigen Kabel wiesen alle Mantelströme von weniger als 0,3 mA auf.

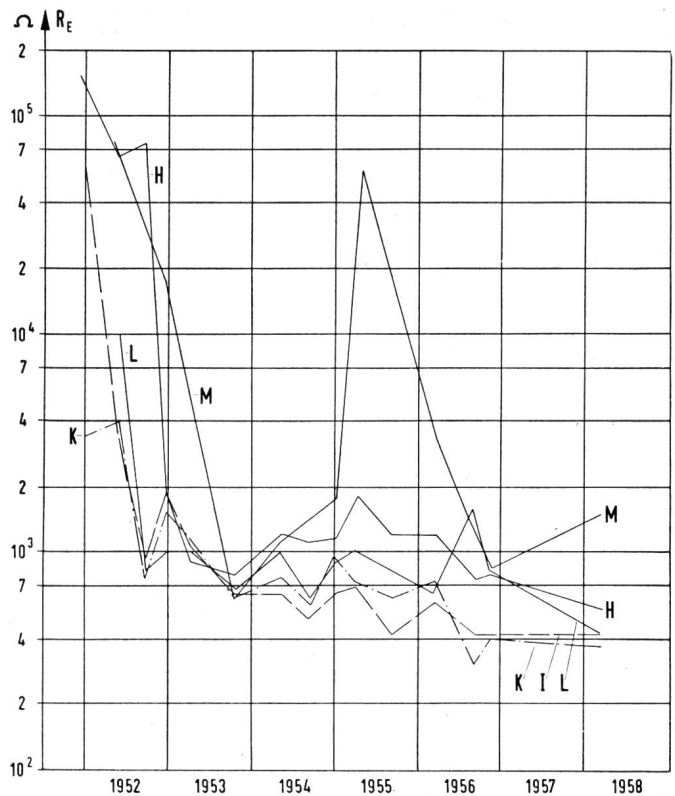


Fig. 2. Erdungswiderstände der Kabel mit Spezialumhüllungen. Die Kabel sind mit den im Text verwendeten Buchstaben bezeichnet (vgl. S. 112)

Résistances de mise à la terre des câbles avec enveloppes spéciales. Les câbles sont désignés par les lettres utilisées dans le texte. Voir page 112

ont été endommagées, lorsque les conducteurs servant à mesurer les courants de gaine ont été soudés sur les gaines de plomb. De ce fait, les valeurs du câble «Sandwich» (câble à l'essai K), du câble entouré d'un ruban de polyéthylène (câble à l'essai I) et du câble avec gaine de polyéthylène extrudé (câble à l'essai H) ne sont pas représentatives.

b) Potentiels

Le potentiel des câbles a été mesuré périodiquement à l'aide d'un voltmètre à lampes et d'une sonde de $Cu/CuSO_4$ saturé. La figure 3 mentionne un seul point de mesure en dehors du «potentiel dit de protection» [2] de -0,55 volts; toutes les autres valeurs se trouvent dans la zone «protégée». En l'occurrence, il y a lieu de considérer que le fer influence sans nul doute le potentiel des câbles armés ou tirés dans des caniveaux en fer zorès.

Nous avons renoncé à représenter les courbes de potentiel des câbles à enveloppe spéciale, étant donné qu'elles se différencient à peine des autres courbes.

c) Courants de gaine

Des courants de gaine pouvant être mesurés circulaient uniquement dans un câble posé à nu dans un caniveau zorès. Ils étaient de 10 mA au maximum. Ainsi que nous l'expliquerons de façon plus détaillée plus loin (voir paragraphe 7), ces courants de compensation du câble relié métalliquement au caniveau

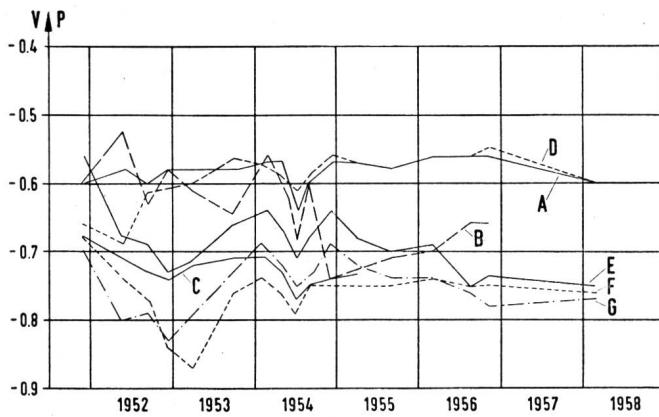


Fig. 3. Potentiale der Kabel mit Juteumhüllungen gemessen gegen eine Cu/CuSO_4 ges.-Elektrode. Die Kabel sind mit den im Text verwendeten Buchstaben bezeichnet (vgl. S. 112)
 Potential des câbles avec enveloppes de jute, mesuré contre une électrode de Cu/CuSO_4 saturé. Les câbles sont désignés par les lettres employées dans le texte. Voir page 112

d) Elektrische Verhältnisse bei den kathodisch geschützten Kabeln

Die Kabel wurden vom Oktober 1951 bis Dezember 1954 stark belastet, um ein Bild über die Gefahr einer kathodischen Korrosion zu erhalten. Das Potential der Bleimäntel lag bei ungefähr -2 V. Gemessen wurde gegenüber einer Cu/CuSO_4 ges.-Elektrode, und zwar unmittelbar nach dem Ausschalten des Polarisationsstromes. Trotz der starken Polarisation wurden keinerlei Spuren einer kathodischen Korrosion festgestellt.

Später wurde das Schutzpotential auf $-0,9 \dots -1,1$ V reduziert. Der Polarisationsstrom betrug während der ersten Phase im Mittel etwa 600 mA beim Kabel mit erhöhtem Phenolgehalt und 200 mA beim normal aufgebauten Kabel des Typs B. Ab 1955 wurden ständig Werte um 40 mA für das «Phenolkabel» und 100 mA für das normale Kabel gemessen.

7. Perforation des Bleimantels beim blanken Kabel nach vier Jahren

Bei einer Kontrollmessung am 3. März 1956 wurde festgestellt, dass der Isolationswiderstand zwischen den Adern beim blank in einen Zoreskanal verlegten Bleikabel (Versuchskabel C) auf 300Ω abgesunken war. Es musste somit seit der letzten Kontrollmessung mit normalem Befund vom 2. September 1955 Feuchtigkeit in das Kabelinnere gedrungen sein. Die Fehlerortung ergab einen Schwerpunkt in etwa 40 m Abstand vom Abschlusskasten. Es wurde daher ein ca. 50 m langes Stück ausgezogen und genauer untersucht. Da die korrodierte Strecke im Lehm Boden lag, wurde zum Vergleich auch ein Stück am Ende des Versuchskabels im Moorboden abgeschnitten und kontrolliert. Während das Kabelstück aus dem Sumpfgebiet nicht korrodiert war, konnten auf der ganzen Länge des aus dem Lehmgebiet ausgezogenen Kabels grössere Korrosionsstellen festgestellt werden. Wie die Figuren 4 und 5 zeigen, hatten sich

zores n'ont pas été la cause des corrosions qui sont apparues. Tous les autres câbles avaient des courants de gaine inférieurs à $0,3$ mA.

d) Conditions électriques régissant les câbles à protection cathodique

D'octobre 1951 à décembre 1954, les câbles ont été soumis à forte charge, pour qu'il soit possible de se faire une idée précise du danger d'une corrosion cathodique. Le potentiel des gaines de plomb était d'environ -2 V. Les mesures ont été faites par rapport à une électrode de Cu/CuSO_4 saturé immédiatement après que le courant de polarisation a été interrompu. Malgré la forte polarisation, aucune trace de corrosion cathodique n'a été constatée.

Par la suite, le potentiel de protection a été ramené à $-0,9 \dots -1,1$ volt. Pendant la première phase, le courant de polarisation était en moyenne de 600 mA environ pour le câble à teneur plus grande en phénol et de 200 mA pour le câble du type B construit normalement. A partir de 1955, on a constamment mesuré des valeurs voisines de 40 mA pour le «câble au phénol» et de 100 mA pour le câble normal.

7. Perforation de la gaine de plomb du câble nu après quatre ans

Une mesure de contrôle, effectuée le 3 mars 1956, a permis de constater que la résistance d'isolement entre les conducteurs du câble sous plomb (câble à l'essai C) posé à nu dans un caniveau zores était tombée à 300 ohms. De l'humidité avait donc dû pénétrer à l'intérieur du câble depuis la dernière mesure de contrôle du 2 septembre 1955, qui avait donné un résultat normal. La localisation du dérangement fit découvrir un point crucial à une distance d'environ 40 mètres de l'armoire terminale. Un tronçon de câble d'environ 50 mètres de long a donc été retiré et examiné minutieusement. Le tronçon corrodé se trouvant dans le terrain argileux, on a aussi coupé, par comparaison, un tronçon à l'extrémité du câble à l'essai dans le sol marécageux et on l'a contrôlé. Tandis que le tronçon de câble provenant de la zone marécageuse n'était pas corrodé, on a pu constater d'importants points de corrosion sur toute la longueur du câble retiré de la zone argileuse. Les figures 4 et 5 montrent qu'il s'était formé des trous profonds en forme de cratères qui étaient souvent sillonnés par de larges fissures orientées de façon arbitraire. Les courants de compensation de 6 mA en moyenne ne sont pas responsables de cette corrosion: cela ressort du fait que les corrosions sont apparues sur un tronçon de câble à l'intérieur duquel le câble recevait du courant et ne le transmettait pas. Les cratères doivent être dus à d'importants courants locaux auxquels étaient superposés les courants de gaine constatés servant de courants de compensation. Les formes de corrosion longues et parallèles à l'axe du câble (fig. 6), qui ont certainement pris naissance aux endroits où le câble touchait le caniveau zores, prouvent que la formation d'éléments provoquée

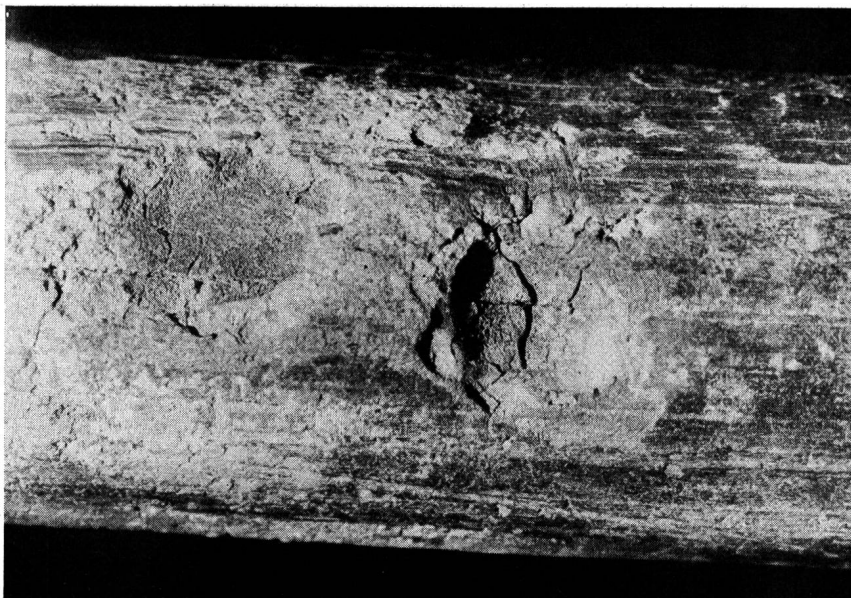


Fig. 4.

Oberfläche des blank in einem Zoreskanal verlegten Versuchskabels (C) nach 4 Jahren. Krater mit willkürlich orientierten Spalten (Vergrößerung 6×)

Surface du câble d'essai (C) posé à nu dans un caniveau zorès, après 4 ans. Cratère avec fissures orientées de façon arbitraire. (Grossi 6 fois)

tiefe, kraterähnliche Löcher gebildet, die oft von breiten, willkürlich orientierten Spalten durchfurcht waren. Dass die Ausgleichsströme von durchschnittlich 6 mA für diese Korrosion nicht verantwortlich waren, geht daraus hervor, dass die Korrosionen in einem Kabelabschnitt aufgetreten sind, innerhalb dem das Kabel Strom aufnahm und nicht abgab. Die Krater müssen durch bedeutende Lokalströme entstanden sein, denen die festgestellten Mantelströme als Ausgleichsströme überlagert waren. Dass auch die Elementbildung infolge differentieller Belüftung und Elektrolytkonzentrationen eine Rolle spielte, geht aus den langgestreckten, parallel zur Kabelachse verlaufenden Korrosionsformen hervor (Fig. 6), die offenbar dort entstanden, wo das Kabel den Zoreskanal berührte. Da im Zoreskanal tropfbares Wasser und Schlamm vorhanden waren, konnten sich an solchen Stellen Konzentrations- bzw. Belüftungsketten ausbilden. Sowohl die groben Spalten bei den Elektrolysekratern als auch die feineren Risse, die ein Längsschnitt durch eine der eben beschriebenen Furchen zeigt (Fig. 7), sind nicht elektrolytisch bedingt, sondern wurden durch eine interkristalline Korrosionskomponente

par une aération et des concentrations électrolytiques différentes a joué un rôle important. Etant donné qu'il y avait de l'eau de suintement et de la boue dans le caniveau zorès, des chaînes de concentration, respectivement d'aération ont pu se constituer à ces endroits-là. Les fissures grossières des cratères provoqués par l'électrolyse et les fissures plus fines que montre une coupe longitudinale à travers l'un des sillons dont on vient de parler (fig. 7) ne sont pas dues à l'électrolyse, mais ont été produites par une composante de corrosion intercrystalline. La figure 7 montre de façon évidente les formes typiques de la corrosion dite du «phénol». Cette constatation prend une importance particulière du fait qu'une corrosion dite du «phénol» s'est produite dans ce cas, sans qu'il existât aucune gaine en matière organique. Il faut également relever le fait que la corrosion dite du «phénol» n'est plus apparue partout, mais uniquement aux endroits qui présentaient une activité électrolytique évidente.

Ces observations permettent de conclure que la corrosion dite du «phénol» peut également apparaître sur les câbles nus – qu'une gaine en matière organique n'est pas une condition sine qua non pour

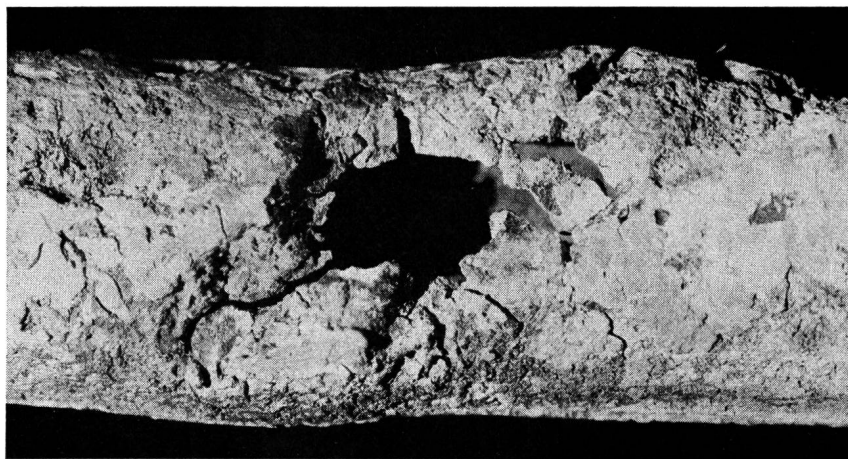


Fig. 5.

Gleiches Kabel wie Figur 4. Durchbruch mit Spalten (Vergrößerung 5×)

Même câble qu'à la figure 4. Rupture avec fissures. (Grossi 5 fois)



Fig. 6.
Gleiches Kabel wie Figur 4. Korrosionsfurchen parallel zur Kabelachse (Vergrößerung 6×)
Même câble qu'à la figure 4. Sillons de corrosion parallèles à l'axe du câble. (Grossi 6 fois)

erzeugt. Figur 7 zeigt unverkennbar die typischen Formen der sogenannten «Phenolkorrosion». Diese Feststellung erhält dadurch eine besondere Bedeutung, weil in diesem Falle eine «Phenolkorrosion» entstand, ohne dass eine Hülle aus organischem Material zugegen war. Ebenso bemerkenswert ist die Tatsache, dass die «Phenolkorrosion» nicht mehr oder weniger überall auftrat, sondern nur an Stellen, die eine merkliche elektrolytische Aktivität aufwiesen.

Diese Beobachtungen lassen den Schluss zu, dass «Phenolkorrosion» auch an blanken Kabeln auftreten kann – dass eine organische Hülle also keine notwendige Voraussetzung für das Auftreten einer «Phenolkorrosion» ist – und dass die Verteilung der Korrosionsgebiete auf dem Bleimantel durch elektrochemische Faktoren gesteuert wird. Es ist sogar möglich, dass gewisse elektrochemische Verhältnisse eine notwendige Voraussetzung dafür sind, dass «Phenolkorrosion» auftreten kann.

8. Zustand der Kabel nach fünf Jahren

Im Winter 1956 wurde im Gebiet des Sumpfes von allen Kabeln je ein Stück von ca. 5 m Länge abgeschnitten und untersucht. Die Zoreskanäle waren nass – die letzten 3 m sogar überschwemmt – leicht verschlammt und angerostet. Der um das Versuchskabel (A) gepackte Lehm war stellenweise dunkelblau verfärbt. Alle Kabel strömten einen dumpfen Modergeruch aus. Die Untersuchung der Kabel im

l'apparition d'une corrosion dite du «phénol» – et que la répartition de zones de corrosion sur la gaine de plomb est réglée par des facteurs électrochimiques. Il est même possible que certaines conditions électrochimiques soient absolument nécessaires pour que la corrosion dite du «phénol» puisse agir.

8. Etat des câbles après cinq ans

En hiver 1956, on a coupé et examiné un bout de cinq mètres environ de tous les câbles posés dans la zone marécageuse. Les caniveaux zorès étaient mouillés – les trois derniers mètres même inondés – légèrement envasés et rouillés. L'argile enveloppant le câble à l'essai (A) avait pris par endroits une coloration bleu foncé. Tous les câbles exhalaient une violente odeur de pourri. L'examen des câbles en laboratoire a démontré qu'aucun de ceux qui se trouvaient dans le sol marécageux ne présentait une corrosion plus forte que de simples traces. On n'a pu constater des traces d'une corrosion dite du «phénol» que sur le câble à l'essai (F) avec alliage d'antimoine et tout à la fin du câble à l'essai (B) armé de feuillard, où l'armure était desserrée. En outre, l'armure du câble (B) armé de feuillard était fortement rouillée, tandis que l'armure des autres câbles armés était encore en très bon état. En revanche, les gaines de jute de tous les câbles étaient plus ou moins fortement pourries. Le tableau I donne une récapitulation du degré de pourriture,

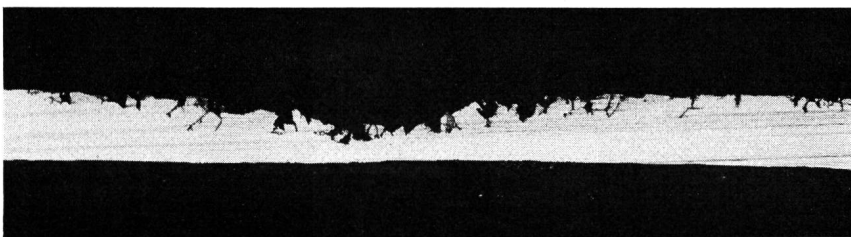


Fig. 7.
Längsschnitt durch eine Korrosionsfurchen, wie sie auf Figur 6 zu sehen sind. Die feinen interkristallinen Spalten sind typisch für «Phenolkorrosion» (Vergrößerung 6×)
Coupe longitudinale à travers un sillon de corrosion, tel qu'il en existe à la figure 6. Les fines fissures intercrystallines présentent les caractères typiques de la corrosion dite du «phénol». (Grossi 6 fois)

Laboratorium ergab, dass keines der Kabel im Moorboden mehr als spurenhaf korrodiert war. Nur beim antimonlegierten Versuchskabel (F) und ganz am Ende des bandarmierten Versuchskabels (B), wo die Armatur gelockert war, konnten Spuren einer «Phenolkorrosion» festgestellt werden. Beim bandarmierten Kabel (B) war zudem die Armatur stark angerostet, bei den übrigen Kabeln war die Bewehrung noch sehr gut erhalten. Die Juteumhüllungen waren dagegen bei allen Kabeln mehr oder weniger stark verrottet. Tabelle I gibt eine Zusammenstellung über den Verrottungsgrad, wobei die folgenden 5 Klassen nach Merkmalen, die leicht im Feld festgestellt werden können, unterschieden werden:

Verrottungsgrad 1: Jute in sehr gutem Zustand, kaum zerreißbar, Zugfestigkeit einer Juteschnur > 10 kg*.

Verrottungsgrad 2: Jute in gutem Zustand, schwer zerreißbar, Zugfestigkeit 5...10 kg*.

Verrottungsgrad 3: Jute deutlich verrottet, leicht zerreißbar, Zugfestigkeit < 5 kg*. Es können aus der Juteumhüllung beliebig lange Einzelschnüre isoliert werden.

Verrottungsgrad 4: Jute stark verrottet, sehr leicht zerreißbar, kann verzapft werden. Längere Stücke einer einzelnen Schnur können nicht mehr gut abgewickelt werden, da die aneinanderklebenden Fasern immer wieder zerreißen. Kleinere Stücklein von ca. 5 cm Länge können dagegen noch leicht isoliert werden.

Verrottungsgrad 5: Jute total abgebaut. Fasern und Schnüre sind kaum mehr erkennbar. Das Imprägnierungsmaterial und die Jute bilden eine

Tabelle I

Zustand der Juteumhüllungen der unbelasteten Kabel im Moorboden, fünf Jahre nach der Verlegung.

Kabeltyp	Verrottungsgrad der Jute am Ende des Kabels (häufig überschwemmt)	Verrottungsgrad der Jute 6 m vom Ende entfernt
Typ B, Reinbleimantel (E)*	4	4
Typ B, Sb-leg. Mantel (F)*	3	4
Typ B, «Phenolkabel» (G)*	2	2
Polyäthylenband gewickelt (J)*	4	4
Polyäthylenmantel gespritzt		
Jute nicht imprägniert (H)*	4	4
«Sandwich» (K)*	4	3
Polymant-Blei-Hackethal (M)*	3	3
Polymant-Stahlwell-Hackethal (L)*	2	3
Direkt in den Boden verlegt:		
Typ B (D)*	4	4
Typ B in Lehm-packung (A)*	4	4
Typ C (bandarmiert) (B)*:		
Äussere Jutelage	3	4
Innere Jute unter Armatur	1	1

* Die Versuchskabel wurden mit den Buchstaben A...M bezeichnet [1].

dont on distingue les cinq classes suivantes selon les caractéristiques que l'on peut facilement constater en campagne:

Degré de pourriture 1: Jute en très bon état, ne pouvant presque pas être déchiré, résistance à la traction d'un fil de jute >10 kg*.

Degré de pourriture 2: Jute en bon état, pouvant être difficilement déchiré, résistance à la traction 5...10 kg*.

Degré de pourriture 3: Jute nettement pourri, pouvant être facilement déchiré, résistance à la traction < 5 kg*. On peut isoler à volonté de longs fils de la gaine de jute.

Degré de pourriture 4: Jute fortement pourri, pouvant être très facilement déchiré et effilé. De longs bouts de fil ne peuvent plus être facilement déroulés, du fait que les fibres collant les unes aux autres se déchirent sans cesse. En revanche, de petits bouts de 5 cm de long environ peuvent encore être facilement isolés.

Degré de pourriture 5: Jute totalement détruit. Les fibres et les fils ne peuvent presque plus être reconnus. La matière d'imprégnation et le jute ne forment plus qu'une seule masse qui, suivant le genre de bitume ou de goudron employé et l'humidité existante, est visqueuse ou cassante. Il n'est plus possible d'isoler de petits bouts de fil.

Tableau I

Etat des gaines de jute des câbles non chargés posés dans le sol marécageux, cinq ans après la pose

Type de câble	Degré de pourriture du jute à l'extrémité du câble (fréquemment inondé)	Degré de pourriture du jute à une distance de 6 m de l'extrémité
Type B, gaine de plomb pur (E)*	4	4
Type B, gaine à alliage d'antimoine (F)*	3	4
Type B, câble au «phénol» (G)*	2	2
Câble entouré d'un ruban de polyéthylène (J)*	4	4
Câble avec gaine de polyéthylène extrudé, jute non imprégné (H)*	4	4
Câble «Sandwich» (K)*	4	3
Câble Hackethal sous plomb avec enveloppe de polymant (M)*	3	3
Câble Hackethal avec gaine d'acier ondulée et enveloppe de polymant (L)*	2	3
Câbles posés directement dans le sol:		
Type B (D)	4	4
Type B, enveloppé d'argile (A)*	4	4
Type C (armé de feuillard) (B)*:		
Couche de jute extérieure	3	4
Jute intérieur sous l'armure	1	1

* Les câbles à l'essai ont été désignés par les lettres A...M [1].

einzigste Masse, die je nach der Art des benutzten Bitumens oder Teers sowie der vorhandenen Feuchtigkeit schmierig bis spröde ist. Schnurstücklein können nicht mehr isoliert werden.

Besonders bemerkenswert ist der gute Zustand der Jute unter der Eisenbandarmatur beim Kabel vom C-Typ (Versuchskabel B). Überraschend gut verhielt sich auch die Jutehülle des Kabels mit erhöhtem Phenolgehalt (Versuchskabel G), obschon bei diesem Kabel die Jute nicht imprägniert worden war, sondern nur die fertig aufgebrachte Jute mit einem Teerprodukt übergossen worden ist. Dass Teerprodukte sehr gut konservieren, wird auch durch die Erfahrung bestätigt, dass die alten mit Teer imprägnierten Kabel oft noch eine sehr gut erhaltene Hülle aufweisen.

Nachdem festgestellt worden war, dass die Kabel im Moorboden – sowohl diejenigen, die in Zoreskanäle als auch die, welche direkt in den Boden verlegt worden waren – nicht oder nur in sehr geringem Masse korrodiert waren, wurden im Gebiete des Schwerpunktes der Korrosion am blanken Bleikabel (vgl. Abschnitt 6) ca. 30 cm lange Probestücke von allen Kabeln des Typ B und vom bandarmierten Kabel herausgeschnitten und untersucht.

In Tabelle II sind die Verrottungsgrade der verschiedenen Kabelumhüllungen zusammengestellt.

Tabelle II

Zustand der Juteumhüllungen der unbelasteten Kabel im Lehmboden, fünf Jahre nach der Verlegung.

Kabeltyp	Verrottungsgrad der Jute
Typ B, Reinbleimantel (E)*	3
Typ B, Sb-leg. Mantel (F)*	4
Typ B, «Phenolkabel» (G)*	2
Direkt in den Boden verlegt:	
Typ B (D)*	4
Typ B in Lehm-packung (A)*	4
Typ C (bandarmiert) (B)*:	
Äussere Jutelage	4
Innere Jutelage	1

* Die Versuchskabel wurden mit den Buchstaben A...M bezeichnet [1].

Bei den drei Kabeln des Typ B (Versuchskabel E, F und G), die in Zoreskanäle verlegt worden waren, konnte ausnahmslos eine beginnende «Phenolkorrosion» festgestellt werden. Beim Kabel mit Reinbleimantel (Versuchskabel E) und beim antimonlegierten Kabel (Versuchskabel F) waren die Korrosionsspuren spiralförmig angeordnet, während beim «Phenolkabel» (Versuchskabel G) die Korrosionsstellen Nester bildeten (vgl. Fig. 8 und 9). Die maximale Tiefe der Freßstellen betrug 0,3 mm oder 20% der Wandstärke (Fig. 10).

Die Kabel, die direkt in den Boden verlegt worden waren, d. h. das bandarmierte Kabel (Ver-

Il y a lieu de noter spécialement le bon état du jute sous l'armure de fer feuillard du câble type C (câble à l'essai B).

La gaine de jute du câble à plus grande teneur en phénol (câble à l'essai G) s'est étonnamment bien comportée, bien que, pour ce câble, le jute n'ait pas été imprégné, mais uniquement arrosé d'un produit goudronneux une fois complètement monté sur le câble. Les produits goudronneux conservent très bien: l'expérience a confirmé que les anciens câbles imprégnés au goudron possèdent souvent encore une gaine en très bon état.

Après avoir constaté que tous les câbles dans le sol marécageux – aussi bien ceux qui avaient été placés dans des caniveaux que ceux qui avaient été directement enfouis dans la terre – n'étaient pas corrodés ou seulement d'une façon tout à fait superficielle, nous avons coupé dans la région du point crucial de la corrosion apparue sur le câble posé à nu (voir paragraphe 6) des échantillons de 30 cm de long environ de tous les câbles du type B et du câble armé de feuillard et les avons examinés.

Le tableau II résume les degrés de pourriture des différentes gaines de câble.

Tableau II

Etat des enveloppes de jute des câbles non chargés dans le terrain argileux, cinq ans après leur pose

Type de câble	Degré de pourriture du jute
Type B, gaine de plomb pur (E)*	3
Type B, gaine alliée à de l'antimoine (F)*	4
Type B, câble au «phénol» (G)*	2
Posés directement dans le sol:	
Type B (D)*	4
Type B, enveloppe d'argile (A)*	4
Type C (armé de feuillard) (B)*:	
Couche de jute extérieure	4
Couche de jute intérieure	1

* Les câbles à l'essai ont été désignés par les lettres A...M [1].

Pour les trois câbles du type B (câbles à l'essai E, F et G) qui avaient été posés dans des caniveaux zorés, on a pu sans exception constater un début de corrosion dite du «phénol». Pour le câble à gaine de plomb pur (câble à l'essai E) et le câble à alliage d'antimoine (câble à l'essai F), les traces de corrosion étaient disposées en forme de spires, tandis que pour le câble «au phénol» (câble à l'essai G) les endroits corrodés formaient des nids (voir fig. 8 et 9). La profondeur maximum des endroits corrodés était de 0,3 mm ou 20% de l'épaisseur de la paroi (fig. 10).

Les câbles qui avaient été posés directement dans le sol, c'est-à-dire le câble armé de feuillard (câble à l'essai B), le câble sous plomb pur du type B (câble à l'essai D) et le câble sous plomb pur du type B enveloppé dans de l'argile (câble à l'essai A), n'étaient pas corrodés, ce qui prouve que les câbles placés dans

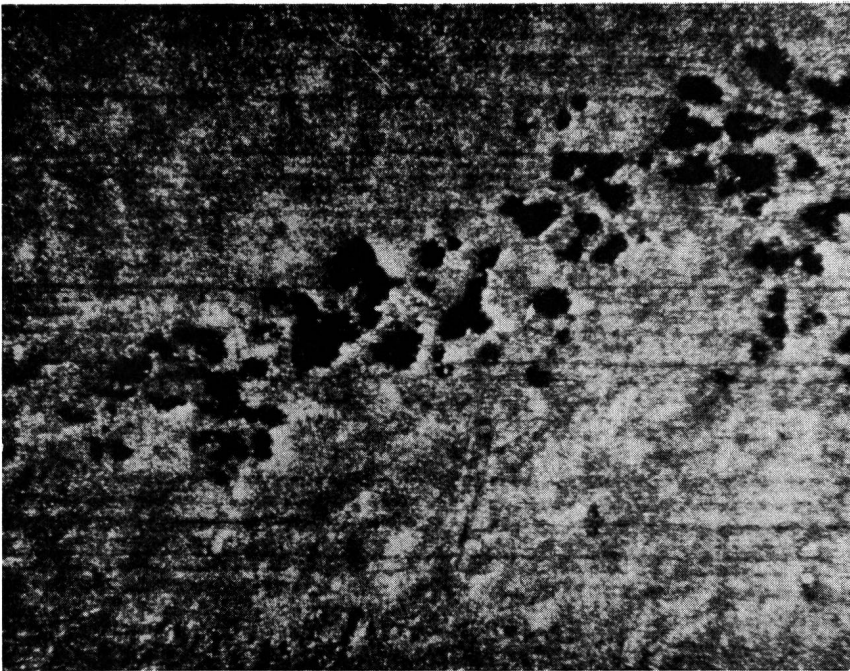


Fig. 8.
Oberfläche des antimonlegierten Bleimantels des Kabels vom Typ B (Versuchskabel F). Die Korrosionsstellen liegen längs der Spur einer Juteschnur (Vergrößerung 40 ×)

Surface de la gaine de plomb à alliage d'antimoine du câble du type B (câble à l'essai F). Les points de corrosion se trouvent le long de la trace du fil de jute. (Grossi 40 fois)

suchskabel B), das Reinbleikabel Typ B (Versuchskabel D) und das in Lehm verpackte Reinbleikabel Typ B (Versuchskabel A), waren nicht korrodiert, was beweist, dass Kabel in Zoreskanälen durch «Phenolkorrosion» gefährdeter sind als direkt in den Boden verlegte Kabel.

Die übrigen Kabeltypen wurden nicht untersucht, da bei den Kabeln mit Spezialumhüllungen eine Probeentnahme die Versuchsbedingungen zu stark gestört hätte.

Kontrolliert wurden dagegen auch die beiden kathodisch geschützten Kabel. Wie bereits erwähnt, sind sowohl das normale Kabel vom Typ B (Versuchskabel A_k) als auch dasjenige mit erhöhtem Phenolgehalt (Versuchskabel B_k) in Zoreskanälen ver-

des caniveaux zorès sont plus exposés au danger de la corrosion dite du «phénol» que ceux qui sont directement enfouis dans le sol.

Les autres types de câbles n'ont pas été examinés, du fait que le prélèvement d'échantillons des câbles à enveloppes spéciales aurait par trop dérangé les conditions des essais.

En revanche, les deux câbles protégés cathodiquement ont été contrôlés. Ainsi que nous l'avons déjà dit, le câble normal du type B (câble à l'essai A_K) et celui à plus grande teneur en phénol (câble à l'essai B_K) ont été posés dans des caniveaux zorès. A l'extrémité du tronçon d'essai, des bouts d'environ 3 m de long ont été coupés et examinés. Comparé à celui de l'installation non chargée, le jute des câbles

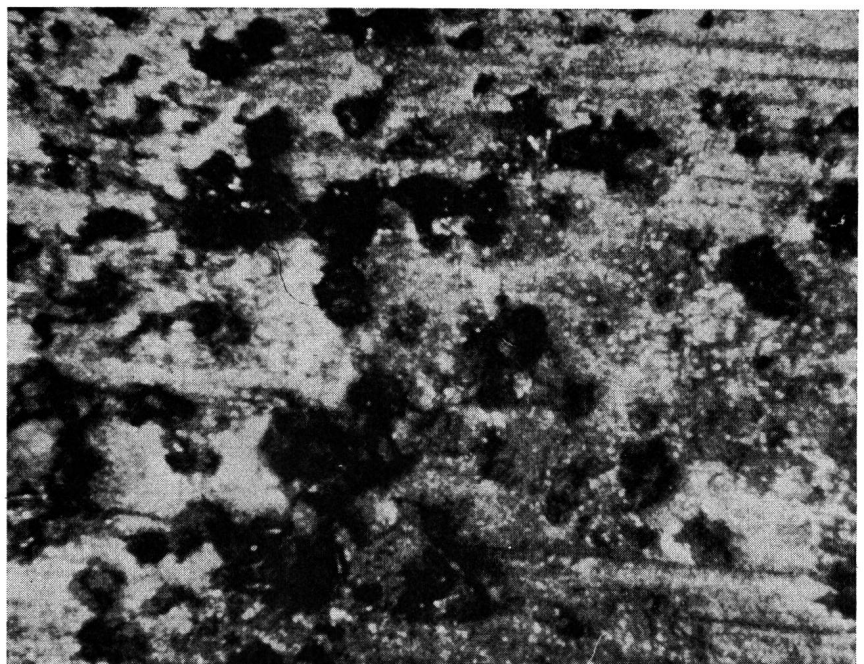


Fig. 9.
Oberfläche des Reinbleimantels des Kabels vom Typ B mit erhöhtem Phenolgehalt (Versuchskabel G) der Imprägniermasse. Die Korrosionsspuren sind ungeordnet und bilden vereinzelte Nester (Vergrößerung 40 ×)

Surface de la gaine de plomb pur du câble du type B à teneur plus grande en phénol de la masse imprégnée (câble à l'essai G). Les traces de corrosion ne sont pas ordonnées et forment des nids isolés. (Grossi 40 fois)

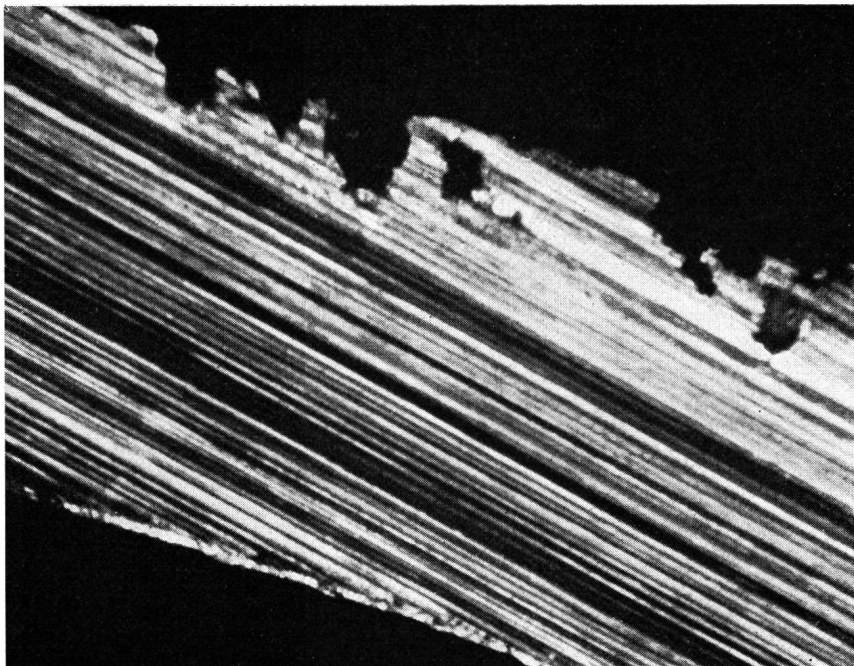


Fig. 10.
Querschnitt durch die Korrosionsstelle von
Figur 9 (Vergrößerung 40 ×).
Coupe à travers l'endroit corrodé de la figure
9. (Grossi 40 fois)

legt. Am Ende der Versuchsstrecke wurden Stücke von ca. 3 m Länge abgeschnitten und untersucht. Die Jute der Kabel war im Vergleich zur unbelasteten Anlage eher noch etwas stärker abgebaut. Die Kabel zeigten indessen keinerlei Korrosionsspuren, auch Krusten von Kalk oder Stellen mit kathodischen Korrosionen fehlten gänzlich. Dabei lagen die Kabel im gleichen Lehmboden, der bei den ungeschützten Kabeln eine merkliche «Phenolkorrosion» bewirkte. Zudem waren die Kabel ungefähr zwei Jahre lang sehr stark polarisiert (ca. -2 V gegenüber einer Cu/CuSO_4 ges.-Elektrode). Es kann somit aus den Versuchsergebnissen geschlossen werden, dass durch kathodischen Schutz eine «Phenolkorrosion» verhindert wurde und dass zudem, selbst bei Polarisationsspannungen von ca. -2 V, keine kathodische Korrosion aufgetreten ist (vgl. dazu auch [3]).

9. Zustand anodisch belasteter Kabelproben nach zwei Jahren

Am 29. Dezember 1954 wurden einige Kabelstücke an den Pluspol der niederohmigen Spannungsquelle (6 V \Rightarrow) angeschlossen, die den Strom für den Versuch mit kathodisch geschützten Kabeln liefert. Die Versuchsstücke wurden nahe beieinander, ca. 1 m tief, in lehmig-humosen Grund verlegt und einzeln mit einem polyäthylenisolierten Draht mit der Spannungsquelle verbunden. Die Bedingungen waren also für alle Kabelstücke praktisch gleich.

Es standen folgende Kabeltypen im Versuch:

- 2 Kabel Typ B mit Reinbleimänteln;
- 1 Kabel Typ B mit Sb-leg. Mantel;
- 1 Kabel Typ B mit erhöhtem Phenolgehalt der Imprägniermasse;
- 1 Kabel Typ C (bandarmiert);
- 1 «Sandwich»-Kabel;
- 1 Polymer-Bleikabel, Hackethal;
- 1 Polymer-Stahlwellmantel, Hackethal.

était un peu plus détruit. Cependant, les câbles ne montraient aucune trace de corrosion, et les croûtes de chaux ou les endroits à corrosion cathodique faisaient complètement défaut. Les câbles se trouvaient dans le même terrain argileux que celui qui avait provoqué une nette corrosion dite du «phénol» des câbles non protégés. En outre, les câbles ont été très fortement polarisés pendant environ deux ans (environ -2 V contre une électrode de Cu/CuSO_4 saturé). Les résultats des essais permettent donc de conclure qu'une protection cathodique a empêché une corrosion dite du «phénol» et que, de plus, aucune corrosion cathodique n'est apparue même sous des tensions de polarisation d'environ -2 V (voir à ce propos aussi [3]).

9. Etat des échantillons de câbles à charge anodique après deux ans

Le 29 décembre 1954, quelques bouts de câbles ont été reliés au pôle positif de la source de tension à faible résistance ohmique (6 V \Rightarrow) qui fournit le courant nécessaire pour l'essai avec des câbles chargés cathodiquement. Les bouts de câbles d'essai ont été placés les uns à proximité des autres à une profondeur d'environ 1 mètre dans un terrain argileux riche en humus et reliés séparément à l'aide d'un fil isolé au polyéthylène à la source de tension. Les conditions étaient donc pratiquement les mêmes pour tous les bouts de câbles.

Les types de câbles suivants ont été soumis à l'essai:

- 2 câbles du type B avec gaines de plomb pur;
- 1 câble du type B avec gaine alliée à de l'antimoine;
- 1 câble du type B avec teneur plus grande en phénol de la masse d'imprégnation;
- 1 câble du type C (armé de feuillard);
- 1 câble «Sandwich»;

In Tabelle III sind die wichtigsten Daten zu diesem Versuch zusammengestellt, der am 6. März 1956 abgebrochen wurde.

Tabelle III

Versuch mit anodisch belasteten Kabelproben

Kabeltyp	Stromaufnahme (mA) am				Stromaufnahme, mittlere (mA/dm ²)
	29.12.54	6. 4. 55	25. 8. 55	3. 3. 56	
Kabel Typ B, Reinbleimantel (∅ 10 mm)	0,06	1,35	4,7	5,0	1,3
Kabel Typ B, Reinbleimantel (∅ 18 mm)	3,2	9,8	16,5	14,7	3,3
Kabel Typ B, Sb-leg. Mantel	0,20	2,55	8,7	9,2	2,3
Kabel Typ B, mit erhöhtem Phenolgehalt	1,1	1,6	5,8	7,2	2,1
Kabel Typ C, Stromquelle mit Eisenband verbunden	9,0	1,6	2,1	0,8	0,3
Sandwich-Kabel	0	0,004	0,003	0,03	0,001
Polymant-Bleikabel	0,80	0,32	0,57	0,37	0,24
Polymant-Stahlwell	0,27	0,15	0,40	0,24	0,09

Die Kabel vom Typ B waren allgemein sehr stark korrodiert und mehrfach perforiert. Völlig unkorrodiert waren dagegen die Mäntel des bandarmierten Kabels vom Typ C sowie der beiden Kabel mit Polymantschutz. Dabei war beim bandarmierten Kabel die Stromquelle mit der Armatur, bei den Kabeln mit Polymantschutz dagegen nur mit dem Bleimantel bzw. dem Stahlwellmantel verbunden. Die Eisenbänder des bandarmierten Kabels Typ C waren stark angerostet und stellenweise durch feine Löcher perforiert.

Bei den Kabeln mit Polymantschutz konnten an den Kabelmänteln keinerlei Korrosionsspuren festgestellt werden. Offenbar wirkte die Polymantmasse als inerte Zwischenleiter. Auch die ganz dünne Aluminiumfolie, die den internen Polymantschutz gegen die äusseren Papierlagen abschliesst, war höchstens spurenhafte korrodiert.

Die Schutzhülle des «Sandwich-Kabels» unterband praktisch den Stromfluss. Nur dort, wo die «Sandwich»-Packung nicht absolut dicht war, konnten sich kleine Korrosionszentren bilden (vgl. Fig. 11), eine Gefahr, die bei jeglichem Schutzmantel aus Isoliermaterial besteht, sobald aus irgendeinem Grunde durchgehende Poren auftreten.

Als Korrosionsprodukte wurden durch eine röntgenographische Analyse [4] festgestellt: Bleidioxid (PbO₂), ein höheres Bleioxid (PbO_{1,87}), rotes Bleioxid (PbO), Bleikarbonat (PbCO₃) und Bleisulfat (PbSO₄). Bei den unbelasteten Kabeln wurden dagegen als Korrosionsprodukte nur Bleikarbonat (PbCO₃) und rotes Bleioxid (PbO) gefunden.

1 câble sous plomb avec enveloppe de polymant, Hackethal;

1 câble avec gaine de tôle d'acier ondulée et enveloppe de polymant, Hackethal.

Le tableau III donne les caractéristiques principales de cet essai, qui a été interrompu le 6 mars 1956.

Tableau III

Essai avec des échantillons de câbles chargés anodiquement

Type de câble	Taux de charge (mA) le				Taux de charge moyen (mA/dm ²)
	29.12.54	6. 4. 55	25. 8. 55	3. 3. 56	
Câble type B, gaine de plomb pur (∅ 10 mm)	0,06	1,35	4,7	5,0	1,3
Câble type B, gaine de plomb pur (∅ 18 mm)	3,2	9,8	16,5	14,7	3,3
Câble type B, gaine à alliage d'antimoine	0,20	2,55	8,7	9,2	2,3
Câble type B avec teneur plus grande en phénol	1,1	1,6	5,8	7,2	2,1
Câble type C, source de courant reliée à l'armure de feuillard	9,0	1,6	2,1	0,8	0,3
Câble «Sandwich»	0	0,004	0,003	0,03	0,001
Câble sous plomb à enveloppe de polymant	0,80	0,32	0,57	0,37	0,24
Tôle d'acier à enveloppe de polymant	0,27	0,15	0,40	0,24	0,09

Règle générale, les câbles du type B étaient très fortement corrodés et perforés en plusieurs endroits. En revanche, les gaines du câble armé de feuillard du type C et des deux câbles à protection de polymant n'étaient absolument pas corrodées. Pour le câble armé de feuillard, la source de courant était reliée à l'armure, tandis que, pour les câbles à protection de polymant, elle n'était raccordée qu'à la gaine de plomb, respectivement la gaine de tôle d'acier. Les rubans de fer du câble armé de feuillard du type C étaient fortement rouillés et présentaient en certains endroits de fines perforations.

Il a été impossible de constater des traces de corrosion sur les gaines des câbles à protection de polymant. La masse de polymant agit manifestement comme conducteur intermédiaire inerte. La toute mince feuille d'aluminium qui isole la protection intérieure de polymant des couches de papier extérieures présentait tout au plus quelques traces de corrosion.

La gaine protectrice du câble «Sandwich» interceptait pratiquement le flux de courant. Ce n'est que là où l'enveloppe «Sandwich» n'était pas absolu-



Fig. 11.

Bleimäntel der anodisch belasteten Kabelproben. Von links nach rechts:
Kabel Typ B mit Reinbleimantel (\varnothing 10 mm)
Kabel Typ B mit antimonlegiertem Bleimantel

Kabel Typ B mit erhöhtem Phenolgehalt der Tränkmass (Reinbleimantel)

«Sandwich»-Kabel mit Korrosion unter einer undichten Stelle der Umhüllung

Kabel Typ B mit Reinbleimantel (\varnothing 18 mm)

Gaines de plomb des échantillons de câbles à charge anodique. De gauche à droite:

Câble type B à gaine de plomb pur (\varnothing 10 mm);
Câble type B à gaine de plomb à alliage d'antimoine;

Câble type B à teneur plus grande en phénol de la masse d'imprégnation (gaine de plomb pur);

Câble «Sandwich» avec corrosion sous un endroit non étanche de l'enveloppe;

Câble type B avec gaine de plomb pur (\varnothing 18 mm)

Vergleicht man die Grösse der an den Bleimänteln festgestellten Korrosionen mit den theoretischen Materialverlusten, so stellt man fest, dass nur etwa die Hälfte des Totalstromes korrosiv wirksam war. Bei den Polymerkabeln war der korrosive Stromanteil praktisch null, obwohl ständig ein merklicher Strom durch die Kabel floss.

Gerade umgekehrt waren die Verhältnisse bei der Korrosion der Eisenbänder des Kabels vom Typ C. Dort war die Verrostung ca. viermal grösser als der anodische Fremdstrom erwarten liess, so dass in diesem Fall offenbar eine starke zusätzliche Korrosion durch Lokalelementtätigkeit bestand.

10. Ausblick

Es ist vorgesehen, die Anlage nach einigen Jahren erneut zu überprüfen und in der Zwischenzeit, wie bis anhin, periodische Kontrollmessungen durchzuführen. Ferner ist beabsichtigt, eine neue Serie von Kabelstücken anodisch zu belasten, um zu prüfen, wie sich weitere Kabeltypen unter anodischen Bedingungen verhalten.

Bibliographie

- [1] Hadorn, E. und R. Hainfeld. 25 Jahre Kabelfehlerstatistik. Techn. Mitt." PTT 1955, Nr. 6, S. 213...230.
- Vingt-cinq ans de statistique des défauts des câbles. Bull. techn. PTT 1955, N° 6, p. 213...230 et N° 7, p. 268...286. Tirage à part.
- [2] Corrosion 12 (1956), 335...370: NACE Technical Committee Reports. Publication 56-13: Cathodic Protection of Lead Sheathed Cables in the Utilities Industry.
- [3] Meister, H. Der kathodische Schutz der Telephonkabel. Techn. Mitt." PTT 1957, Nr. 1, S. 7...14.
La protection cathodique des câbles téléphoniques. Bull. techn. PTT 1957, N° 1, p. 7...14.
- [4] Mauch H. Probleme der Bleikabelkorrosion (5. Mitteilung). Techn. Mitt." 1957, Nr. 6, S. 227...239.
- Problèmes de la corrosion des câbles sous plomb (5° communication). Bull. techn. PTT 1957, N° 6, p. 227...239.

ment étanche que des petits centres de corrosion purent se former (voir fig. 11), danger qui menace n'importe quelle gaine en matière isolante, dès que des pores perméables apparaissent pour un motif quelconque.

Une analyse radiographique [4] a permis de constater les produits de corrosion suivants: bioxyde de plomb (PbO_2), un oxyde de plomb plus élevé ($PbO_{1,87}$), protoxyde de plomb rouge (PbO), carbonate de plomb ($PbCO_3$) et sulfate de plomb ($PbSO_4$). En revanche, dans les câbles non chargés, on n'a découvert comme produits de corrosion que du carbonate de plomb ($PbCO_3$) et du protoxyde de plomb rouge (PbO).

En comparant l'importance de la corrosion constatée sur les gaines de plomb avec les pertes de matériel théoriques, on remarque que seule la moitié environ du courant total avait un effet corrosif. Pour les câbles à enveloppe de polyment, la fraction de courant corrosive était pratiquement nulle, bien qu'un faible courant circulât constamment à travers les câbles.

Les conditions de corrosion des rubans de fer du câble du type C étaient tout autres. La rouille y était à peu près quatre fois plus importante que ne le laissait prévoir le courant étranger anodique, de sorte que, dans ce cas, l'activité d'éléments locaux provoquait certainement, une forte corrosion complémentaire.

10. Perspective

On prévoit d'examiner à nouveau l'installation dans quelques années et de procéder d'ici là à des mesures de contrôle comme cela s'est fait jusqu'ici. En outre, on a l'intention de charger anodiquement une nouvelle série de bouts de câbles, pour contrôler comment se comportent d'autres types de câbles sous charge anodique.