

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: 44 (1966)

Heft: 5

Artikel: Propagation des ondes en eau douce = Wellenausbreitung im Süßwasser

Autor: Dessoulavy, R. / Hunkeler, A.

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-874571>

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: 16.03.2025

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

TECHNISCHE MITTEILUNGEN

BULLETIN TECHNIQUE

PTT

BOLLETTINO TECNICO

Herausgegeben von den Schweizerischen Post-, Telephon- und Telegraphen-Betrieben – Publié par l'entreprise des postes, téléphones et télégraphes suisses – Pubblicato dall'Azienda delle poste, dei telefoni e dei telegrafi svizzeri

Roger DESSOULAVY, Lausanne, und Adrian HUNKELER, Bern

621.371(204.1)
621.396.944

Propagation des ondes en eau douce Wellenausbreitung im Süsswasser

Zusammenfassung. Die Beschreibung des Vorganges der Wellenausbreitung führt auf Gleichungen für den Dämpfungsbelag im Wasser. Anschliessend werden der Aufbau und die Arbeitsweise der Messanlage dargestellt. Die damit erzielten Messergebnisse bestätigen die Berechnungen. Tiefe Frequenzen bieten einen Vorteil für Verbindungszwecke und für die Peilung.

Résumé. L'analyse du phénomène de la propagation des ondes mène aux équations pour l'affaiblissement linéique dans l'eau. On décrit ensuite le dispositif et le fonctionnement de l'ensemble de mesure. Les résultats ainsi obtenus confirment les calculs. Les fréquences basses offrent des avantages en ce qui concerne les besoins de communication et de radiogoniométrie.

Riassunto. Propagazione delle onde nell'acqua dolce. L'analisi del fenomeno di propagazione delle onde conduce alle equazioni per l'attenuazione unitaria nell'acqua. Si descrive in seguito la struttura e il funzionamento dell'apparecchiatura di misura. I risultati delle misure effettuate confermano i calcoli. Le frequenze basse offrono vantaggi per le comunicazioni e la radiogoniometria.

1. Introduction

Il est bien connu que les liaisons radio avec des submersibles en plongée dans la mer s'effectuent avec des ondes très longues (dizaines de kHz), étant donné que leur affaiblissement augmente considérablement avec la fréquence. Il s'avère généralement plus favorable d'établir des liaisons avec les sous-marins ou entre eux par ultra-sons, dont la portée est nettement plus considérable et qu'il est possible de concentrer en faisceaux.

La raison de l'affaiblissement des ondes électromagnétiques dans l'eau s'explique par la conductivité du milieu dans lequel les ondes se propagent. Dans l'air, qui est un isolant, le champ électrique de l'onde n'engendre aucun courant de conduction, toute l'énergie de l'onde est conservée au cours de sa propagation. Dans l'eau, par contre, des courants circulent d'autant plus intensément que la conductivité est élevée, ils soutirent à l'onde l'énergie nécessaire à

1. Einleitung

Es ist wohl bekannt, dass die Radioverbindungen mit Unterseebooten während des Tauchens im Meer mit sehr langen Wellen (Frequenzen von 10...30 kHz) bewerkstelligt werden, weil die Dämpfung mit der Frequenz beträchtlich ansteigt. Es erweist sich meistens als günstiger, die Verbindungen mit Tauchbooten oder zwischen solchen mit Ultraschall auszuführen, dessen Reichweite erheblich grösser ist, und dessen Strahlung man in Bündel zusammenfassen kann.

Die Ursache der Abschwächung der elektromagnetischen Wellen im Wasser erklärt sich aus der Leitfähigkeit des Mediums, in dem sich die Wellen ausbreiten. In der Luft, die ein Isolator ist, erzeugt das elektrische Feld der Welle keinen Leitungsstrom; alle Energie der Welle bleibt im Verlaufe der Ausbreitung erhalten. Im Wasser dagegen fliessen umso grössere Ströme, je höher die Leitfähigkeit ist; sie entzie-

couvrir les pertes par effet Joule, ce qui explique l'amortissement de l'onde.

Les sels dissous dans l'eau salée lui confèrent une conductivité quelques centaines de fois plus grande que celle de l'eau douce. On peut donc s'attendre à obtenir pour cette dernière un affaiblissement des ondes radio nettement plus faible qu'en mer.

L'occasion unique offerte par la présence du mésoscaph dans le Léman nous a incités à vérifier expérimentalement ces propriétés, ce qui, à notre connaissance, n'avait pas encore été tenté. Les expériences ont pu heureusement se réaliser au début de 1965 dans le cadre d'une série d'expériences scientifiques touchant à des domaines divers (pollution des eaux, gravimétrie, géologie...), et pour lesquelles l'Exposition Nationale Suisse a mis son submersible à disposition.

2. Calcul de l'affaiblissement des ondes

Les équations de Maxwell permettent de calculer aisément les conditions de propagation des ondes dans un milieu caractérisé par :

$$\begin{aligned} \mu &= \mu_r \mu_0 && \text{perméabilité} \\ \varepsilon &= \varepsilon_r \varepsilon_0 && \text{permittivité} \\ \sigma &&& \text{conductivité} \end{aligned}$$

Dans le cas de l'eau :

$$\mu_r = 1, \text{ d'où : } \mu = \mu_0 = 0,4\pi \cdot 10^{-6} \text{ H/m}$$

$$\varepsilon_r \simeq 81, \text{ d'où : } \varepsilon \simeq \frac{81 \cdot 10^{-9}}{36\pi} = \frac{9 \cdot 10^{-9}}{4\pi} \text{ F/m}$$

$$\sigma \simeq 4,6 \Omega^{-1} \text{ m}^{-1} \text{ pour l'eau salée}$$

$$\sigma \simeq 16,2 \cdot 10^{-3} \Omega^{-1} \text{ m}^{-1} \text{ pour l'eau douce à environ } 5^\circ \text{C.}$$

Valeur mesurée au cours des plongées.

Il est à remarquer que la conductivité varie avec la température (augmentation d'environ 2% par °C).

Rappelons que pour une onde plane l'exposant linéique de propagation peut être tiré des valeurs citées plus haut et de la fréquence f :

$$\bar{\gamma} = \alpha + j\beta = \sqrt{j\omega\mu(\sigma + j\omega\varepsilon)} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \alpha &= \text{Re} \{ \bar{\gamma} \} && \text{affaiblissement linéique en N/m} \\ \beta &= \text{Im} \{ \bar{\gamma} \} && \text{déphasage linéique en rad/m} \\ \omega &= 2\pi f && \text{pulsation en s}^{-1} \\ & && f && \text{fréquence en Hz} \end{aligned}$$

Nous nous intéressons particulièrement à la valeur de l'affaiblissement linéique α , qui caractérise la baisse exponentielle de l'intensité des champs électriques et magnétiques avec la distance, ici la profondeur en dessous de la surface.

L'analyse exacte du problème de la transmission d'ondes planes en provenance d'un émetteur lointain et frappant la surface de l'eau avec un certain angle d'incidence est relativement compliquée. La majeure

part de l'énergie, qui est nécessaire, pour couvrir les pertes par effet Joule, ce qui explique l'amortissement de l'onde.

Die im Meerwasser gelösten Salze verleihen diesem eine Leitfähigkeit, die mindestens hundertmal grösser ist als jene des Süßwassers. Man darf also erwarten, für Süßwasser eine erheblich schwächere Dämpfung der Radiowellen zu erhalten als im Meer.

Die einzigartige Gelegenheit, die sich dank der Anwesenheit des Mesoscaphs im Genfersee bot, bewog uns, diese Eigenschaften experimentell nachzuprüfen, was unseres Wissens bisher noch nie versucht worden ist. Die Messungen liessen sich Anfang 1965 im Rahmen einer Reihe wissenschaftlicher Untersuchungen gut verwirklichen. Diese betrafen verschiedene Gebiete (Gewässerverschmutzung, Gravimetrie, Geologie usw.) und wurden dadurch ermöglicht, dass die Direktion der Schweizerischen Landesausstellung 1964 (Expo) ihr Tauchboot «Mesoscaph» dazu zur Verfügung stellte.

2. Berechnung der Abschwächung der Wellen

Die Maxwell'schen Gleichungen gestatten die Ausbreitungsbedingungen der Wellen in einem Medium einfach zu berechnen, das durch folgende Eigenschaften gekennzeichnet ist :

$$\begin{aligned} \mu &= \mu_r \mu_0 && \text{Permeabilität} \\ \varepsilon &= \varepsilon_r \varepsilon_0 && \text{Permittivität} \\ \sigma &&& \text{Leitfähigkeit} \end{aligned}$$

Im Falle des Wassers :

$$\mu_r = 1, \text{ woraus } \mu = \mu_0 = 0,4\pi \cdot 10^{-6} \text{ H/m}$$

$$\varepsilon_r \simeq 81, \text{ woraus } \varepsilon \simeq \frac{81 \cdot 10^{-9}}{36\pi} = \frac{9 \cdot 10^{-9}}{4\pi} \text{ F/m}$$

$$\sigma \simeq 4,6 \Omega^{-1} \text{ m}^{-1} \text{ für Salzwasser}$$

$$\sigma \simeq 16,2 \cdot 10^{-3} \Omega^{-1} \text{ m}^{-1} \text{ für Süßwasser bei etwa } 5^\circ \text{C,}$$

im Verlaufe der Tauchfahrten gemessener Wert.

Es ist zu bemerken, dass sich die Leitfähigkeit mit der Temperatur ändert (Anstieg von ungefähr 2% je °C).

Erinnern wir daran, dass der Übertragungsbelag der Ausbreitung einer ebenen Welle aus den oben aufgeführten Werten und der Frequenz f abgeleitet werden kann :

$$\bar{\gamma} = \alpha + j\beta = \sqrt{j\omega\mu(\sigma + j\omega\varepsilon)} \quad (1)$$

wobei

$$\begin{aligned} \alpha &= \text{Re} \{ \bar{\gamma} \} && \text{Dämpfungsbelag in N/m} \\ \beta &= \text{Im} \{ \bar{\gamma} \} && \text{Phasenbelag in rad/m} \\ \omega &= 2\pi f && \text{Kreisfrequenz in s}^{-1} \\ & && f && \text{Frequenz in Hz} \end{aligned}$$

Wir interessieren uns besonders für den Wert des Dämpfungsbelags α , der den exponentiellen Abfall der Intensität der elektrischen und magnetischen Felder mit der Entfernung, hier der Tiefe unterhalb der Oberfläche, beschreibt.

Die exakte Untersuchung des Problems der Übertragung ebener Wellen, die von einem fernen Sender

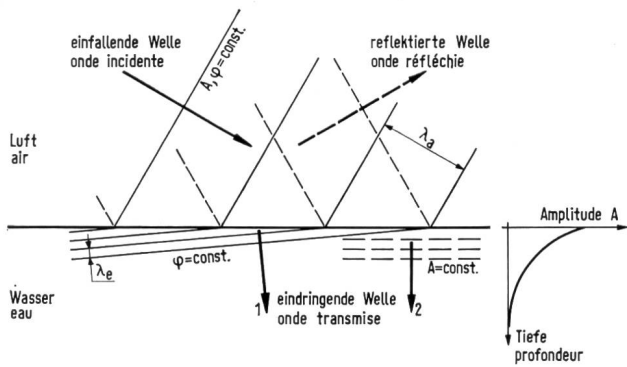


Fig. 1

λ_a = Longueur d'onde dans l'air – Wellenlänge in der Luft
 λ_e = Longueur d'onde dans l'eau – Wellenlänge im Wasser

partie de l'onde est réfléchié et seule une petite fraction pénètre dans l'eau. L'onde ainsi transmise est caractérisée par des plans distincts de phase et d'amplitude constantes. Alors que l'onde se propage apparemment obliquement selon les lois de la réfraction, son amplitude varie selon la verticale ainsi que l'illustre la *figure 1*. Le calcul montre que l'affaiblissement avec la profondeur est pratiquement le même que celui d'une onde avec incidence normale (*fig. 2*), ce qui facilite grandement la suite des calculs. On tirera donc l'affaiblissement linéique directement de l'équation (1):

$$\alpha = \text{Re} \{ \bar{\gamma} \} = \text{Re} \{ \sqrt{j \omega \mu (\sigma + j \omega \epsilon)} \} \quad (2)$$

Deux cas limites sont à envisager et donnent des résultats simples:

Fréquences relativement basses

Pour les fréquences suffisamment basses, telles que:

$$\omega \epsilon \ll \sigma$$

l'équation (2) donne:

$$\alpha = \sqrt{\frac{\omega \mu \sigma}{2}} = \sqrt{\pi f \mu \sigma} \quad (3)$$

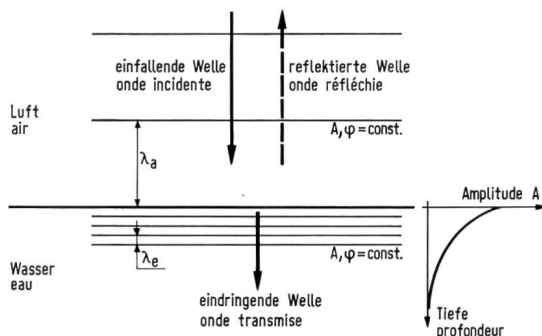


Fig. 2

λ_a = Longueur d'onde dans l'air – Wellenlänge in der Luft
 λ_e = Longueur d'onde dans l'eau – Wellenlänge im Wasser

stammen und unter einem bestimmten Winkel auf die Wasseroberfläche auftreffen, ist verhältnismässig kompliziert. Der grösste Teil der Welle wird reflektiert, und nur ein kleiner Bruchteil dringt in das Wasser ein. Die so übermittelte Welle ist gekennzeichnet durch bestimmte Ebenen konstanter Phase und Amplitude. Während sich die Welle entsprechend den Brechungsgesetzen anscheinend schräg fort-pflanzt, ändert sich deren Amplitude in der Vertikalen, wie dies *Figur 1* darstellt. Die Berechnung zeigt, dass die Abschwächung mit der Tiefe praktisch dieselbe ist wie jene einer Welle mit senkrechtem Einfall (*Fig. 2*). Dies erleichtert in der Folge die Rechnungen wesentlich. Man kann somit den Dämpfungsbelag unmittelbar aus der Gleichung (1) ableiten:

$$\alpha = \text{Re} \{ \bar{\gamma} \} = \text{Re} \{ \sqrt{j \omega \mu (\sigma + j \omega \epsilon)} \} \quad (2)$$

Es sind zwei Grenzfälle ins Auge zu fassen, die einfache Ergebnisse liefern.

Relativ tiefe Frequenzen

Für genügend tiefe Frequenzen, bei denen

$$\omega \epsilon \ll \sigma$$

ist, ergibt die Gleichung (2)

$$\alpha = \sqrt{\frac{\omega \mu \sigma}{2}} = \sqrt{\pi f \mu \sigma} \quad (3)$$

Das ist der Fall bei einem Medium, das man als «guten Leiter» bezeichnet. Man stellt fest, dass es vorteilhaft ist, möglichst tiefe Frequenzen zu verwenden, um eine schwache Dämpfung zu erhalten.

Im übrigen ist die Wellenlänge durch den Wert von β gekennzeichnet, der derselbe ist wie α :

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{\omega}{v} = \sqrt{\frac{\omega \mu \sigma}{2}} \quad (4)$$

Die Schnelligkeit v der Wellen ist also viel kleiner als in der Luft.

Relativ hohe Frequenzen

Für Frequenzen, bei denen

$$\omega \epsilon \gg \sigma$$

ergibt die Gleichung (2)

$$\alpha = \alpha_{\max} = \frac{1}{2} \sigma \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \quad (5)$$

Das ist der obere Grenzwert des Dämpfungsbelages, der nun unabhängig von der Frequenz ist, sofern σ , μ und ϵ von ihr unabhängig sind. Dies entspricht einem Medium mit schwachen Verlusten je Wellenlänge. Als Anhaltspunkt berechnen wir diesen Dämpfungsbelag für Salz- und Süsswasser mit den vorstehend angegebenen Zahlenwerten

$$\alpha_{\max} = \begin{cases} 97 \text{ N/m (840 dB/m) im Salzwasser} \\ 0,34 \text{ N/m (2,95 dB/m) im Süsswasser} \end{cases}$$

Die Variation des Dämpfungsbelags für einen ausgedehnten Frequenzbereich ist in *Figur 3* dargestellt.

C'est le cas du milieu dit « bon conducteur ». On constate l'avantage qu'il y a à utiliser des fréquences les plus basses possibles pour obtenir un faible affaiblissement.

Par ailleurs, la longueur d'onde est caractérisée par la valeur de β qui est la même que celle de α :

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{\omega}{v} = \sqrt{\frac{\omega \mu \sigma}{2}} \quad (4)$$

La célérité v des ondes est alors beaucoup plus faible que dans l'air.

Fréquences relativement élevées

Pour les fréquences telles que :

$$\omega \varepsilon \gg \sigma$$

l'équation (2) donne :

$$\alpha = \alpha_{\max} = \frac{1}{2} \sigma \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \quad (5)$$

C'est la valeur limite maximale de l'affaiblissement linéique, qui est alors indépendante de la fréquence, pour autant que σ , μ et ε en soient indépendants. Cela correspond au cas d'un milieu avec faibles pertes par longueur d'onde.

A titre indicatif, calculons cet affaiblissement linéique pour l'eau salée et pour l'eau douce avec les valeurs numériques citées plus haut :

$$\alpha_{\max} = \begin{cases} 97 \text{ N/m (840 dB/m) en eau salée} \\ 0,34 \text{ N/m (2,95 dB/m) en eau douce} \end{cases}$$

La variation de l'affaiblissement linéique pour une gamme étendue de fréquences est représentée à la figure 3.

3. Dispositif de mesure

Au cours d'essais préliminaires, nous avons constaté dans la gamme de fréquences de 16 à 1000 kHz la présence de différents signaux assez forts, dont l'intensité de champ variait peu au cours d'une

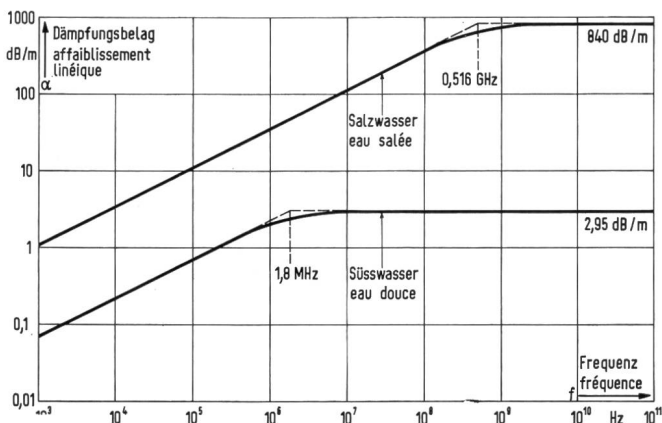


Fig. 3

Affaiblissement linéique α en fonction de la fréquence f
Dämpfungsbetrag α in Funktion der Frequenz f

3. Messverfahren

Bei der Vorbereitung der Messreihe zeigte sich, dass im Frequenzbereich 16...1000 kHz verschiedene starke Signale einfielen, deren Feldstärken im Laufe des Tages wenig änderten. Aus diesem Grunde erübrigte sich ein eigener Sender, und man stellte für den Mesoscaphe eine Empfangsanlage bereit, wie sie in den Figuren 4 und 5 schematisch dargestellt ist. Diese bestand im wesentlichen aus folgenden Teilen :

- Rahmenantenne, ausgespannter isolierter Leiter, Schiffsrumpf teilweise in den Rahmenkreis einbezogen;
- einstellbarer Kondensator, ergibt zusammen mit der Rahmeninduktivität einen Parallel-Schwingkreis;
- Empfänger Siemens E 566, Regelspannung als Mass der HF-Spannung herausgeführt auf
- Gleichspannungsverstärker Keithley, Modell 610
- Tintenschreiber Esterline 1 mA zur Registrierung der HF-Spannung in Funktion der Tiefe.

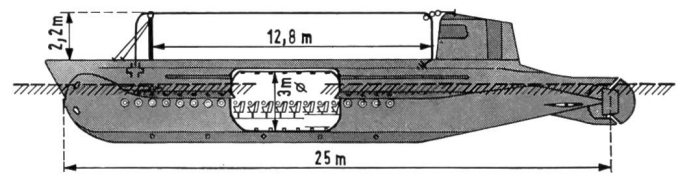


Fig. 4

Mésoscaphe avec antenne à cadre
Mesoscapf mit Rahmenantenne

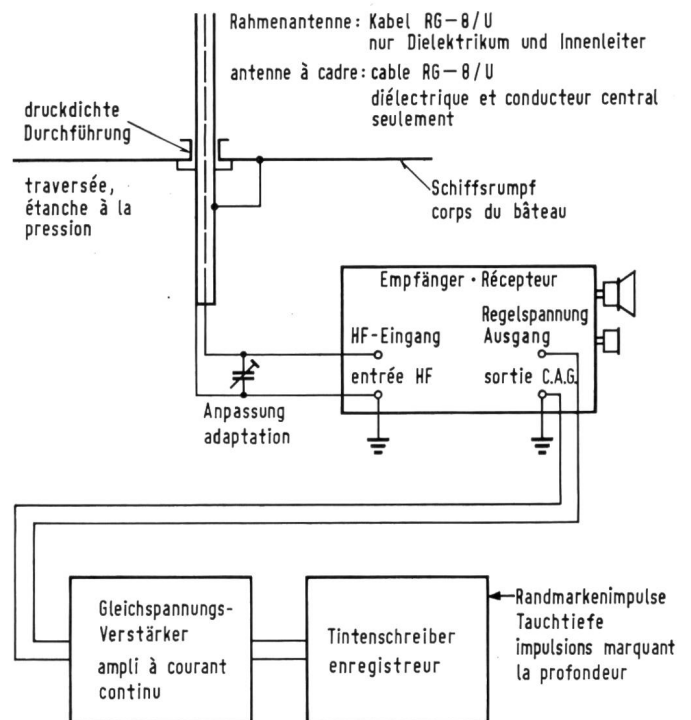


Fig. 5

Schéma de principe du dispositif de réception
Blockschema der Empfangsanlage

journee. Pour cette raison, il fut possible de se passer d'un emetteur propre, et il suffit de preparer pour le mesoscapher un dispositif de reception, tel qu'il est represente schematiquement dans les figures 4 et 5. Cet ensemble comprend essentiellement les parties suivantes :

- antenne a cadre, constituee par un fil isole tendu et une partie du corps du bateau
- condensateur variable, formant un circuit resonant parallele avec l'inductivite du cadre
- recepteur Siemens E 566, dont la tension de controle automatique du gain (variant avec la tension HF a l'entree) etait branchee sur
- un amplificateur a courant continu, Keithley modele 610
- un enregistreur Esterline 1 mA, enregistrant la tension HF en fonction du temps, pour une variation reguliere de la profondeur.

En principe, une antenne sensible au champ electrique aurait aussi pu etre utilisee. Mais aux frequences choisies, l'adaptation du cadre a la haute impédance d'entree du recepteur etait realisable avec des moyens simples. La traversée coaxiale étanche à la pression fut conçue par l'Expo et construite par l'EPUL.

Les émetteurs de télégraphie et de radiodiffusion mentionnés ci-après servaient pour les mesures. Leur intensité de champ fut déterminée en surface sur une vedette à l'emplacement des plongées :

Emetteur	Rugby Angleterre	Loran C Espagne	Europe I Sarre	Sottens
fréquence	16	100	180	764 kHz
puissance	250	100	400	150 kW
distance	860	≈ 700	290	22 km
azimut	320	≈ 240	5	32°
intensité de champ	2,2	1,6	11,2	112 mV/m

4. Résultats des mesures

Pour avoir des conditions aussi stables que possible et sans perturbations électriques des moteurs, nous avons fait les mesures lors de plongées et de remontées statiques du bateau, avec azimut constant et faible vitesse d'avancement. Au cours des différentes plongées, la variation de l'amplitude HF fut enregistrée. Les valeurs moyennes de ces mesures sont données par la figure 6.

En utilisant une échelle logarithmique pour la tension HF, U , la décroissance exponentielle avec la profondeur z (centre de l'antenne à cadre) apparaît clairement. L'influence de la fréquence sur l'affaiblissement linéique se traduit par les pentes différentes des droites. On peut alors indiquer l'affaiblissement linéique mesuré et le comparer avec le calcul (figure 3). Le tableau ci-dessous donne en outre l'erreur relative r de nos observations.

Grundsätzlich hätte auch eine, auf das elektrische Feld ansprechende Antenne dienen können. Die Rahmenantenne liess sich jedoch auf den gewählten Frequenzen mit einfachen Mitteln auf den hochohmigen Empfängereingang anpassen. Die druckdichte Koaxialkabel-Durchführung wurde von der Expo entworfen und von der Ecole polytechnique der Universität Lausanne (EPUL) ausgeführt.

Für die Messungen dienten nachstehend verzeichnete Telegraphie- und Rundspruchsender. Die Feldstärke dieser Sender wurde auf dem Begleitboot an der Oberfläche über der Eintauchstelle ermittelt :

Sender	Rugby England	Loran C Spanien	Europe I Saarland	Sottens
Frequenz	16	100	180	764 kHz
Leistung	250	100	400	150 kW
Distanz	860	≈ 700	290	22 km
Azimut	320	≈ 240	5	32°
Feldstärke	2,2	1,6	11,2	112 mV/m

4. Messergebnisse

Im Interesse möglichst stabiler, störungsfreier Messbedingungen wurde das statische Tauchen und Aufsteigen des Schiffes mit konstantem Azimut und kleiner Vorwärtsbewegung angewendet. Anlässlich der verschiedenen Fahrten wurde der Verlauf der HF-Amplitude registriert. Die Mittelwerte dieser Messreihen sind in Figure 6 dargestellt.

Durch Anwenden eines logarithmischen Massstabes für die HF-Spannung U wird die exponentielle Abnahme dieser Grösse mit zunehmender Tiefe z (Mitte der Rahmenantenne) klar ersichtlich. Die Frequenz-Abhängigkeit des Dämpfungsbelags äussert sich in der unterschiedlichen Steilheit der Geraden. Es ist nun möglich, den gemessenen Dämpfungsbelag anzugeben und ihn mit dem berechneten (Fig. 3) zu ver-

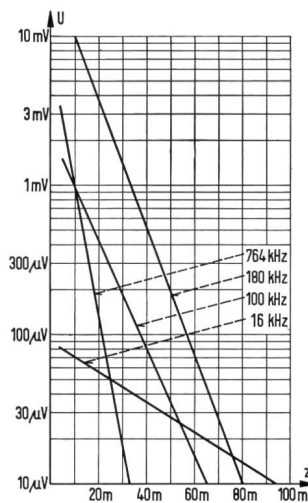


Fig. 6

Tension HF reçue U en fonction de la profondeur z
Empfangene HF-Spannung U in Funktion der Tauchtiefe z

fréquence	f	16	100	180	764 kHz
erreur relat.	r	± 12	$\pm 9,4$	$\pm 7,0$	$\pm 11 \%$
α mesuré		0,20	0,71	0,90	1,75 dB/m
α calculé		0,29	0,71	0,95	1,84 dB/m

Cette comparaison démontre une bonne concordance entre la théorie et la mesure.

Pour compléter les résultats ci-dessus, voici encore quelques observations supplémentaires faites au cours de ces mesures. En faisant tourner le bateau sous l'eau, nous avons pu juger de l'effet directif de notre antenne à cadre. Lors de cet essai de radiogoniométrie, on mesura pour les émetteurs présents les azimuts prévus. A une profondeur de 10 m, le rapport entre les tensions de réception maximum et minimum était de 16 dB à 16 kHz et de 13 dB à 100 kHz. Il existe donc aussi pour l'exactitude du relevé un avantage à utiliser des fréquences basses. En ce qui concerne le facteur de surtension du cadre, nous n'avons pratiquement pas noté de différence lorsque le cadre était hors de l'eau ou dans l'eau à la fréquence de 16 kHz, par contre pour les fréquences plus hautes le facteur de surtension tombait pour le cadre immergé à la moitié environ de sa valeur dans l'air.

Pour terminer, rappelons que les conditions de réception dans l'eau sont données par les propriétés du dispositif et par les niveaux du signal utile et des parasites. Il était possible de capter des signaux télégraphiques à 16 kHz jusqu'à une profondeur de 100 m avec un matériel qui n'était pas trop compliqué.

gleiches. Diese Tabelle enthält ferner den relativen Fehler r unserer Beobachtungen.

Frequenz	f	16	100	180	764 kHz
relat. Fehler	r	± 12	$\pm 9,4$	$\pm 7,0$	$\pm 11 \%$
α gemessen		0,20	0,71	0,90	1,75 dB/m
α berechnet		0,29	0,71	0,95	1,84 dB/m

Diese Gegenüberstellung zeigt ein gutes Übereinstimmen von Theorie und Messung.

Zur Abrundung des Bildes seien im folgenden noch einige weitere Ergebnisse angedeutet: Das Drehen des Bootes unter Wasser ermöglichte eine Aussage über die Richtwirkung unserer Rahmenantenne. Bei diesem Peilversuch ergaben sich die erwarteten Azimutzahlen der einfallenden Sender. Für die Frequenzen 16 beziehungsweise 100 kHz betrug das Verhältnis der Maxima und Minima der Empfangsspannung 16 beziehungsweise 13 dB in einer Tiefe von 10 m. Es besteht somit auch für die Peilschärfe ein Vorzug hinsichtlich der tiefen Frequenzen. Bezüglich der Rahmenkreisgüte in der Luft oder im Wasser lag bei 16 kHz praktisch kein Unterschied vor, wogegen dieser Wert im zweiten Fall bei höheren Frequenzen etwa auf die Hälfte abfiel.

Abschliessend sei darauf hingewiesen, dass die Empfangsmöglichkeiten unter Wasser durch die Eigenschaften der Anlage sowie durch den Nutzsignal- und Störpegel gegeben sind. Es war mit nicht besonders hochgezüchtetem Material möglich, Telegrafiezeichen auf 16 kHz bis zu 100 m Tauchtiefe aufzunehmen.