

Lösung zur 4. Übung zur Einführung in die Geophysik I

Thema der Übung: Georadar

Th. Bohlen, E. Gottschämmer

Aufgabe 1

- a) Die Georadar-Methode ist eine geophysikalische Methode zur Untersuchung des Untergrunds und basiert auf folgendem Prinzip:
- Georadar-Antenne sendet gepulste elektromagnetische Wellen aus (siehe Aufgabe 2), die an Grenzflächen reflektiert werden (siehe Aufgabe 3). Die Registrierung der reflektierten Wellen erfolgt mit zweiter Georadar-Antenne. Häufig befinden sich Sende- und Empfangsantenne im gleichen Gehäuse.
 - Aus der Zeit, die zwischen Senden und Empfangen vergangen ist, lässt sich Geschwindigkeit der elektromagnetischen Wellen berechnen, wenn die Entfernung zum Reflektor bekannt ist.
 - Aus der Geschwindigkeit kann man auf elektromagnetische Eigenschaften der Gesteine schließen.
 - In Praxis häufig umgekehrter Fall: Sind die elektromagnetischen Eigenschaften der Gesteine bekannt, kann man aus der gemessenen Zeit Geschwindigkeit der elektromagnetischen Wellen berechnen (siehe Aufgabe 4) und damit auf Entfernung zum Reflektor schließen (siehe Aufgabe 5).
 - Bei Georadar-Anwendungen wird, je nach Fragestellung, mit Antennen unterschiedlicher Nominalfrequenz gearbeitet.
 - Auflösevermögen und Eindringtiefe der elektromagnetischen Wellen hängen vom Frequenzbereich ab (siehe Aufgabe 2). Prinzipiell lässt sich sagen: Je höher die Nominalfrequenz der Antenne, um so feiner die Auflösung und geringer die Eindringtiefe.
 - Auswertung erfolgt mit Methoden, die denen der Reflexionsseismik vergleichbar sind (z.B. Migration)
- b) Die Methode hat vielfältige Anwendungen. Einige davon sind:
- Detektion von Höhlen und Spalten
 - Kartierung von oberflächennahen Ablagerungen
 - Kartierung von sedimentären alluvialen Ablagerungen
 - Permafrost-Untersuchungen
 - Untersuchungen der Eisdicke und Bewegung von Gletschern
 - Bestimmung der internen Strukturen von Gletschereis
 - Beschaffenheit des Straßenuntergrunds
 - Suche nach unterirdisch verlegten Kabeln und Rohren
 - Untersuchung der Beschaffenheit von Betonstrukturen
 - Suche nach Leckagen in Gasleitungen
 - Kartierung und Überwachung von Grundwasserverunreinigungen
 - archäologische Untersuchungen: Bauwerke, Gräber, Straßenzüge
 - forensische Untersuchungen

c) Die Geschwindigkeit der elektromagnetischen Wellen im Gestein wird durch die elektromagnetischen Materialeigenschaften des Gesteins beeinflusst. Diese werden beschrieben durch

- die elektrische Permittivität ϵ
- die relative magnetische Permeabilität μ_R und
- die elektrische Leitfähigkeit σ .

In der Praxis wird häufig die relative elektrische Permittivität ϵ_R (auch Dielektrizitätszahl genannt) verwendet, die die Permittivität relativ zur Permittivität des Vakuums $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}$ angibt:

$$\epsilon_R = \epsilon / \epsilon_0$$

Außerdem wird die Leitfähigkeit σ mit der Permittivität ϵ und der Kreisfrequenz $\omega = 2 \pi f$ zum Verlustfaktor P zusammengefasst, für den gilt:

$$P = \sigma / \omega \epsilon.$$

d) Der verwendete Frequenzbereich liegt zwischen 100 MHz und 1 GHz.

e) Sowohl bei der Georadarmethode als auch in der Seismik werden Wellen in den Untergrund gestrahlt und deren Reflexionen und Refraktionen an Schichtgrenzen und Heterogenitäten analysiert. Es handelt sich also in beiden Fällen um ein Wellenverfahren. Die verwendeten Wellen unterscheiden sich jedoch. In der Seismik verwendet man elastische Wellen, während in der Georadarmethode elektromagnetische Wellen eingesetzt werden.

Aufgabe 2

Mit $f_1 = 120 \text{ MHz}$, $f_2 = 500 \text{ MHz}$, $f_3 = 900 \text{ MHz}$ berechnet man die entsprechenden Pulsweiten zu $T_1 = 8,3 \text{ ns}$, $T_2 = 2 \text{ ns}$ und $T_3 = 1,1 \text{ ns}$. Anschließend bestimmt man die Geschwindigkeiten aus $v = c / \sqrt{\epsilon_R}$ zu $v_{\text{Erde}} = 0,075 \text{ m/ns}$ und $v_{\text{Kalk}} = 0,11 \text{ m/ns}$. Daraus erhält man für feuchte Erde die Wellenlängen $\lambda_1 = 0,625 \text{ m}$, $\lambda_2 = 0,15 \text{ m}$ und $\lambda_3 = 0,083$ sowie das Auflösungsvermögen der Antennen $r_1 = 15,6 \text{ cm}$, $r_2 = 3,8 \text{ cm}$ und $r_3 = 2,1 \text{ cm}$. Für Kalkstein erhält man Wellenlängen von $\lambda_1 = 0,913 \text{ m}$, $\lambda_2 = 0,22 \text{ m}$ und $\lambda_3 = 0,122 \text{ m}$ und vertikale Auflösungen von $r_1 = 22,9 \text{ cm}$, $r_2 = 5,5 \text{ cm}$ und $r_3 = 3,1 \text{ cm}$. Die Auflösung ist groß für kleinere Nominalfrequenzen der Georadarantennen und steigt bei steigender Geschwindigkeit der elektromagnetischen Wellen.

MERKE: Auflösungsvermögen der Georadar-Antennen hängt von Nominalfrequenz ab und steigt mit steigender Nominalfrequenz, ebenso wie bei steigender Geschwindigkeit des Gesteins. Die verwendeten Antennen müssen also immer der Fragestellung angepasst werden (z.B. in welcher Tiefe wird Anomalie vermutet, welche Geschwindigkeiten werden erwartet?)

Aufgabe 3

- a) Mit der gegebenen Formel für den Reflexionskoeffizienten und den relativen elektrischen Permittivitäten von Eis und Fels berechnet man:

$$R = \frac{\sqrt{5} - \sqrt{4}}{\sqrt{5} + \sqrt{4}} = 0,0557$$

Nur etwa 6% des Signals wird an der Gletscherbasis reflektiert.

$$T = 1 - R = 0,9443$$

Etwa 94% des Signals wird in den Felsen transmittiert.

- b) Hier handelt es sich um einen Drei-Schichten-Fall. Reflexions- und Transmissionskoeffizienten werden an jeder Grenzfläche getrennt berechnet. An der ersten Grenzfläche (Trockener Schnee-Eis) gilt:

$$|R| = \left| \frac{\sqrt{2} - \sqrt{4}}{\sqrt{2} + \sqrt{4}} \right| = 0,1716$$

Somit ist $T = 1 - R = 0,8284$. Dieser Anteil des Signals wird in die Eisschicht transmittiert. Im Fall der verlustfreien Ausbreitung wird dieser Signalanteil die zweite Grenzfläche erreichen. Dort wird von diesem Anteil 0,6% des Signals reflektiert (siehe Teilaufgabe a) und 94% transmittiert. Dies spricht einem Transmissionsanteil des ursprünglichen Signals von $T_{\text{gesamt}} = 0,8284 \cdot 0,9443 = 0,7823$ und somit etwa 78%.

Im Fall von feuchtem Schnee beträgt der Reflexionskoeffizient an der ersten Grenzfläche

$$|R| = \left| \frac{\sqrt{3} - \sqrt{4}}{\sqrt{3} + \sqrt{4}} \right| = 0,0718.$$

Der Transmissionskoeffizient berechnet sich dann zu $T = 1 - R = 0,9282$. Reflexions- und Transmissionskoeffizient an der zweiten Grenzfläche entsprechen wieder den Werten aus Teilaufgabe a), so dass die gesamte Transmission durch $T_{\text{gesamt}} = 0,9282 \cdot 0,9443 = 0,8765$ beschrieben wird.

MERKE: Liegen die relativen elektrischen Permittivitäten ϵ_R nah beieinander, so wird ein Großteil des Signals transmittiert.

Aufgabe 5

- a) Aus Aufgabe 4 ist bekannt $v = c / \sqrt{(\epsilon_R)}$ und $c = 3 \cdot 10^8$ m/s. Mit der gegebenen relativen

elektrischen Permittivität von Eis $\epsilon_R = 4$ berechnet man die Geschwindigkeit der elektromagnetischen Wellen in Eis zu $v = 0,15 \text{ m/ns}$. Mit dieser Geschwindigkeit haben sich die Wellen in der Zeit $t = 2500 \text{ ns}$ von der Antenne zur Gletscherbasis ausgebreitet, sind an der Gletscherbasis reflektiert worden und haben sich mit der gleichen Ausbreitungsgeschwindigkeit zurück zur Antenne bewegt. Der zurückgelegte Weg beträgt also $x = 2d$, mit der Dicke des Gletschers d . Aufstellen der Gleichung $v = x/t = 2d/t$, Auflösen nach d und Einsetzen der gegebenen Werte führt zu

$$d = vt/2 = 187,5 \text{ m.}$$

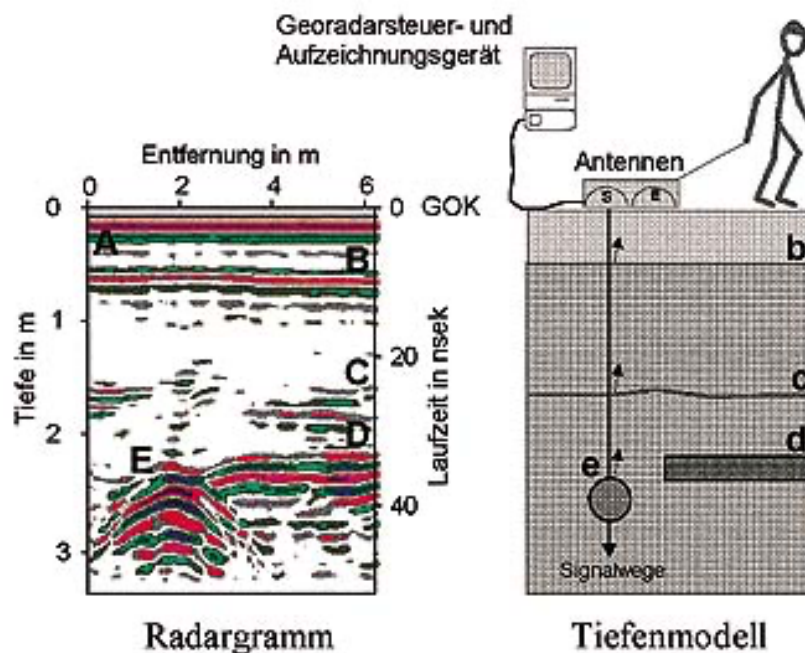
- b) Mit $v = c/\sqrt{(\epsilon_R)}$, $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ und der gegebenen relativen elektrischen Permittivität von $\epsilon_R = 5$ berechnet man die Geschwindigkeit der elektromagnetischen Wellen zu $v = 0,134 \text{ m/ns}$.

In 15 ns legen die elektromagnetischen Wellen mit der Geschwindigkeit $v = 0,134 \text{ m/ns}$ den Weg $x = 2d$ zurück ($v = x/t = 2d/t$). Auflösen nach d und Einsetzen der Werte führt zu einer Tiefe von

$$d = vt/2 = 1 \text{ m.}$$

Die Tiefenachse kann dann in das Radargramm eingezeichnet werden (siehe Abbildung unten).

- c) Das dazugehörige Untergrundmodell könnte qualitativ folgendermaßen aussehen:



(Quelle der Abbildungen: www.denkmalpflege-hessen.de)