

Werk

Jahr: 1957

Kollektion: fid.geo

Signatur: 8 Z NAT 2148:23

Digitalisiert: Niedersächsische Staats- und Universitätsbibliothek Göttingen

Werk Id: PPN101433392X_0023

PURL: http://resolver.sub.uni-goettingen.de/purl?PPN101433392X_0023

LOG Id: LOG_0042

LOG Titel: Schallgeschwindigkeitsmessungen von Eis in Abhängigkeit von Druck und Temperatur

LOG Typ: article

Übergeordnetes Werk

Werk Id: PPN101433392X

PURL: <http://resolver.sub.uni-goettingen.de/purl?PPN101433392X>

OPAC: <http://opac.sub.uni-goettingen.de/DB=1/PPN?PPN=101433392X>

Terms and Conditions

The Goettingen State and University Library provides access to digitized documents strictly for noncommercial educational, research and private purposes and makes no warranty with regard to their use for other purposes. Some of our collections are protected by copyright. Publication and/or broadcast in any form (including electronic) requires prior written permission from the Goettingen State- and University Library.

Each copy of any part of this document must contain there Terms and Conditions. With the usage of the library's online system to access or download a digitized document you accept the Terms and Conditions.

Reproductions of material on the web site may not be made for or donated to other repositories, nor may be further reproduced without written permission from the Goettingen State- and University Library.

For reproduction requests and permissions, please contact us. If citing materials, please give proper attribution of the source.

Contact

Niedersächsische Staats- und Universitätsbibliothek Göttingen
Georg-August-Universität Göttingen
Platz der Göttinger Sieben 1
37073 Göttingen
Germany
Email: gdz@sub.uni-goettingen.de

Mitteilung 1

Schallgeschwindigkeitsmessungen von Eis in Abhängigkeit von
Druck und TemperaturVon W. Lotze, Hannover ¹⁾

Zusammenfassung: Es wird über Geschwindigkeitsmessungen longitudinaler Schallwellen in Eisstäben in Abhängigkeit von Temperatur und gerichtetem Druck berichtet.

Die Untersuchungen haben ergeben, daß ein geringes Anwachsen der Geschwindigkeit mit abnehmender Temperatur und zunehmenden gerichtetem Druck vorhanden ist.

Abstract: Measurements of the velocity of longitudinal sound waves in ice show a slight encrease of velocity with decreasing temperature and encreasing stress. Numerical values are given.

Versuchsanordnung und Durchführung der Messungen:

Zur Messung der Schallgeschwindigkeit an stabförmigen Proben (ca. 50 cm Länge x 5 cm Ø) stand eine elektronische Apparatur nach *Baule* [1] zur Verfügung. Mit einer Folgefrequenz von 50 Hz werden Ultraschallimpulse ausgesandt, die nach Durchlaufen einer bestimmten Strecke abgegriffen werden und nach Rückverwandlung in elektrische Energie die y-Koordinate eines Elektronenstrahl-Oscillografen steuern. Die Zeitablenkung (x-Koordinate) erfolgt synchron mit den Sendeimpulsen, um ein stehendes Bild zu bekommen. Als Zeitnormal dient ein Quarz-Generator, der in Abständen von 10 Mikrosekunden den Elektronenstrahl dunkelsteuert. Zur Markierung des Nullpunktes der Zeitskala wird der Sendeimpuls eingeblendet, während das aufgenommene Signal mit der jeweiligen Laufzeitverzögerung erscheint. Bei guten Einsätzen kann die Laufzeit bis auf etwa 1-2 Mikrosekunden abgelesen werden, während das aufgenommene Signal mit der jeweiligen Laufzeitverzögerung erscheint (Abb. 1).

Da nur Längen- und Laufzeitunterschiede gemessen werden konnten, wurden Messungen bei verschiedenen Längen (jeweils um 5 cm steigend) zu einem Beobachtungssatz zusammengefaßt. Zur Ermittlung der Schallgeschwindigkeit wurde dann einerseits grafisch die Laufzeitkurve konstruiert als auch rechnerisch die ausgleichende Gerade festgelegt (im folgenden werden nur die rechnerischen Werte benutzt).

Aus 289 Einzelbeobachtungen in 32 Sätzen ergibt sich ein mittlerer Fehler der einzelnen Laufzeitmessung von 1,6 Mikrosekunden. Der relative

¹⁾ Dr. Wendelin Lotze, Prakla, Hannover.

Fehler für die Schallgeschwindigkeit aus einem Beobachtungssatz ergibt sich hiernach zu 1,3 %, doch sind zusätzliche systematische Fehler nicht ausgeschlossen: der Einsatz ist nicht absolut scharf und das Bild des Seismogramms abhängig von der Verstärkung des Signals. Auch waren die Laufzeitänderungen bei den Versuchen nur gering, so daß sich der Beobachter die Zahlenwerte einprägen oder bei schlechten Einsätzen im Sinne gleicher Differenzen (Entfernungen äquidistant eingestellt) schätzen konnte. Auf eine weitere Unsicherheit wegen der Verwendung eines kurzzeitigen Impulses anstelle einer diskreten Frequenz wird später eingegangen.

Da sich die Genauigkeit dieser Methode im Laufe der Versuche als unzureichend erwies, wurde zu fotografischer Registrierung übergegangen.

Dabei wurde die Kippfrequenz verdoppelt, um die Zeitauflösung von vornherein zu erhöhen (daher Überlagerung von Abriß und Einsatz) (Abb. 2). Zur Verbesserung der Energieübertragung und damit der Schärfe des Einsatzes wurde der Empfänger fest gegen das Ende des Probestabes gepreßt. Allerdings konnten so nur noch Änderungen der Schallgeschwindigkeit in

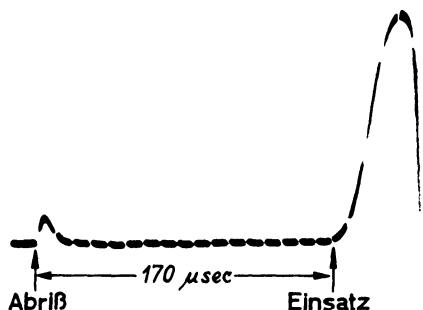


Abb. 1: Oscillogramm eines Ultraschallimpulses bei Durchlaufen einer stabförmigen Eisprobe (elektronische Apparatur nach Baule).

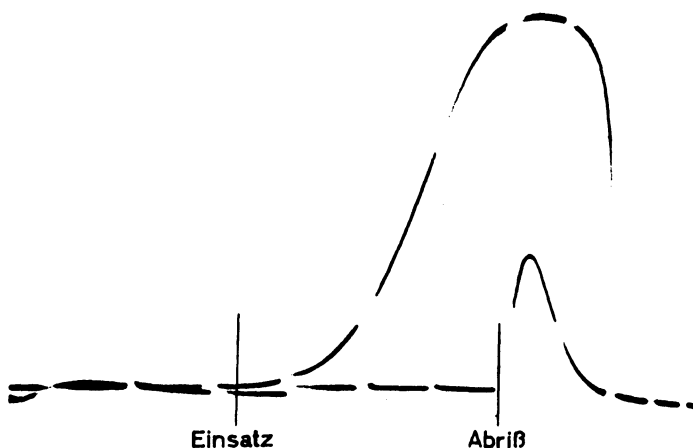


Abb. 2: Oscillogramm mit verdoppelter Kippfrequenz. Einsatz- und Abrißmoment sind durch Vergleich mit Standardkurven (siehe Abb. 3) festgelegt.

Abhängigkeit von Druck und Temperatur beobachtet werden, nicht die Absolutwerte selbst. Die Unsicherheit bei der genauen Festlegung des Einsatzmomentes geht so nicht in das Endergebnis ein.

Zur Auswertung wurde aus einer Reihe fast übereinstimmender Oscillogramme eine Mittelkurve und weiterhin unter Veränderung des Maßstabes in y-Richtung ein Kurvennetz berechnet (Abb. 3). Mittels dieser Standardkurven konnte unbeeinflusst von der jeweiligen Amplitude des Signals der Zeitpunkt des Einsatzes einheitlich festgelegt werden. Die Nichtlinearität des Verstärkers wurde bei der Berechnung der Kurvenschar berücksichtigt, ebenso auch die Nichtlinearität des Zeitmaßstabes bei der Bestimmung der Zeitdifferenz zwischen Abriß und Einsatz. Insgesamt dürfte die Genauigkeit dieses Meß- und Auswerteverfahrens 1/2 Mikrosekunde oder 0,3% übersteigen. Nur Kurven mit besonders kleiner Amplitude des Einsatzes sind unsicherer und möglicherweise mit einem systematischen Fehler behaftet.

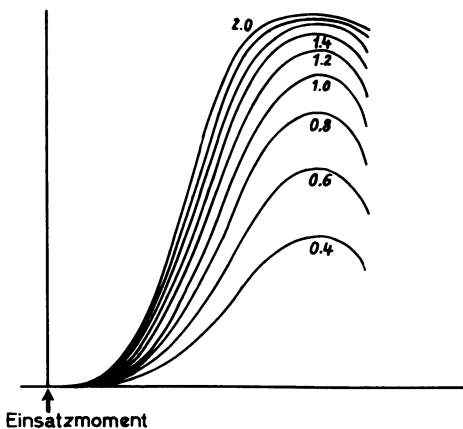


Abb. 3: Standardkurven zur einheitlichen Festlegung des Einsatzmomentes unabhängig von Verstärkung (Parameter) und Verstärkernichtlinearität.

Die Versuche wurden in einem Kälteraum vorgenommen, dessen Temperaturen bis etwa -5°C abgesenkt werden konnte. Zur Erzielung tieferer Temperaturen bis ca. -30°C würden die Proben zusätzlich in einer improvisierten Kältetruhe mit flüssigem Sauerstoff gekühlt.

Meßergebnisse

Temperaturabhängigkeit der Schallgeschwindigkeit

Die Werte der Schallgeschwindigkeit, die sich nach der Laufzeitmethode ergeben, und die jeweiligen Streubereiche der Einzelmessung sind in Abb. 4 dargestellt. Im Bereich zwischen -17 und -10°C streuen die Werte nicht mehr als dem mittleren Fehler entsprechend. Die Schallgeschwindigkeit liegt bei 3570 m/sec, während eine eindeutige Abhängigkeit von der Temperatur nicht nachzuweisen ist. Zwischen -10 und 0°C streuen die Werte stärker, doch läßt sich eine Abnahme der Geschwindigkeit mit steigender Temperatur erkennen. Der Wert für 0 Grad dürfte zwischen 3400 und 3500 m/sec liegen.

Die Beobachtungen mit fotografischer Aufzeichnung ergeben genauere Werte. Da – wie oben erwähnt – keine Absolutwerte bestimmt werden konnten, wurde der recht gut gesicherte Wert von 3570 m/sec bei -13°C aus den visuellen Beobachtungen zur Festlegung einer absoluten Skala übernommen. Abb. 5 zeigt die Schallgeschwindigkeit als Funktion der Temperatur. Die Streuung der Einzelbeobachtungen ist bei Temperaturen unter -1° gering (ca. $\pm 0,2\%$) und liefert einen recht gut gesicherten Verlauf der Temperaturkurve. Zwischen $-0,5$ und 0°C streuen die Werte stärker, da teilweises Abschmelzen der Probe eintrat. Für 0°C selbst ergibt sich ein Wert von 3450 m/sec $\pm 1-2\%$. Gleicherweise wie aus den visuellen

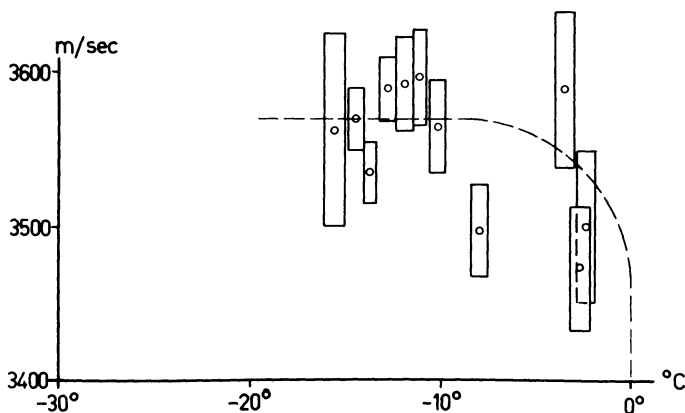


Abb. 4: Schallgeschwindigkeit von Eis in Abhängigkeit von der Temperatur (visuelle Beobachtungen).

Beobachtungen zeigt sich, daß die Geschwindigkeit unter -8°C innerhalb der Meßgenauigkeit konstant bleibt.

Ein Näherungswert für den linearen Ausdehnungskoeffizienten von Eis konnte zusammen mit den übrigen Messungen ermittelt werden, und zwar relativ gegen gleichfalls der Temperaturänderung ausgesetzte Einspannung aus Eisen (hierfür wurde ein Wert von $1 \cdot 10^5$ angenommen). Für den Temperaturbereich von 0 bis -30°C ergibt sich ein Wert von $1,7 \cdot 10^{-5}$.

Druckabhängigkeit der Schallgeschwindigkeit

Untersucht wurde die Abhängigkeit der Geschwindigkeit von gerichtetem Druck (Stress) in Schallrichtung. Die geringe Knickfestigkeit der verwendeten verhältnismäßig schlanken Stäbe ließen nur Belastungen bis zu etwa 15 kp/cm² zu. Dementsprechend waren die Änderungen der Schallgeschwindigkeit nur gering. Die Ergebnisse der Versuche sind in Tab. 1 dargestellt; die Werte sind durch rechnerische Ausgleichung gewonnen. Nur

die Tendenz der Zunahme der Geschwindigkeit mit steigendem Druck ist gesichert, während der Zahlenwert von $4,7 \pm 2 \frac{\text{m/sec}}{\text{kp/cm}^2}$ (gewogenes Mittel

aller Bestimmungen) nur als Größenordnung zu werten ist. Die Längenänderungen der Eisproben bei Belastung wurden bei der Auswertung berücksichtigt.

Wellenausbreitung im Stab und Deutung der Ergebnisse

Die Fortpflanzung von longitudinalen Schallwellen in einem Stab, dessen Querdimensionen klein gegen die Wellenlänge sind, erfolgt mit der Geschwindigkeit:

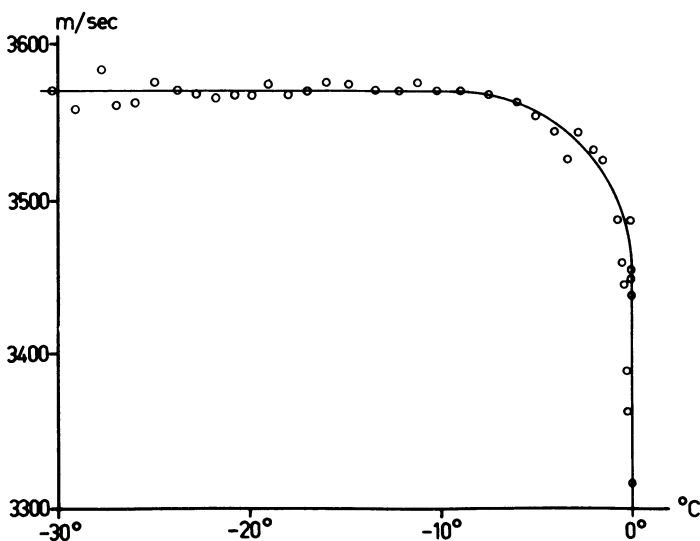


Abb. 5: Schallgeschwindigkeit von Eis in Abhängigkeit von der Temperatur (fotografische Registrierung).

$$v_{\text{Stab}} = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad \begin{array}{l} E = \text{Elastizitätsmodul} \\ \rho = \text{Dichte} \end{array}$$

Im Kontinuum (Dimensionen groß gegen Wellenlänge) ist die Geschwindigkeit:

$$v_{\text{Kont}} = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \sqrt{\frac{(1-\sigma)}{(1+\sigma)(1-2\sigma)}}$$

Mit einem Wert der *Poissonschen* Konstanten $\sigma = 0,33$, ergibt sich für das Verhältnis der Geschwindigkeiten im Kontinuum und im Stab:

$$v_{\text{Kont}} \approx v_{\text{Stab}} \sqrt{\frac{3}{2}} \approx 1,1 \cdot v_{\text{Stab}}$$

Wenn auch die Proben stabförmig waren, so ist doch das Verhältnis von Wellenlänge zu Proben-Querdimensionen zu untersuchen. Die Eigenschwingung des Ultraschallgebers einschließlich angekoppelter Probe lag bei 21 kHz, woraus sich bei $v = 3600$ m/sec eine Wellenlänge von 18 cm ergibt. Bei einem Durchmesser der Proben von 5 cm wäre die Bedingung Stab gerade erfüllt. Tatsächlich wurde aber der erste Einsatz der Schwingungen beobachtet und nicht ihr freies Ausschlagen. Es handelt sich also nicht mehr um einen Vorgang definierter Frequenz sondern vielmehr um die Übertragung eines breiten Frequenzspektrums. Dabei breitet sich jede Teilschwingung mit der Geschwindigkeit aus, die dem Verhältnis ihrer Wellenlänge zum Durchmesser entspricht (und zwischen den Geschwindigkeiten für die beiden Grenzfälle Stab und Kontinuum liegt). Anders formuliert: es tritt im Stab eine scheinbare Schalldispersion auf für die Wellenlängen, die gleiche Größenordnung wie die Querausdehnung haben. Die Form eines Schallsignals erleidet daher bei seinem Durchgang durch einen Stab eine Verformung im Sinne einer Verflachung der Stirn, da die Teilwellen großer Wellenlänge relativ langsamer sind. Die Oscillogramme lassen diesen Vorgang gut erkennen.

Die Schallgeschwindigkeit, die sich bei der Auswertung ergibt, ist nicht ohne weiteres in ein quantitatives Verhältnis zu den beiden Grenzfällen Stab oder Kontinuum einzuordnen. Es ist anzunehmen, daß fast die Geschwindigkeit im Kontinuum erreicht wurde, da bei der Auswertung vornehmlich der scharfe Knick und der erste steile Anstieg des Schallimpulses berücksichtigt wurden. Eine quantitative Behandlung dieser Vorgänge steht noch aus.

Es sei darauf hingewiesen, daß die *Poissonsche* Zahl aus dem Vergleich der Schallgeschwindigkeit im Stab und im Kontinuum bestimmt werden kann, wobei der Übergang von einem zum anderen Grenzfall in einfacher Weise durch Änderung der Frequenz erfolgen kann.

Zusammenstellung der Materialkonstanten für Eis

Die Daten beziehen sich auf homogenes, feinkristallines Eis, das bei Temperaturen von -4° unter häufigerem Umrühren gewonnen war.

	bei -10 bis -25°C	: $3570 \text{ m/sec} \pm 2\%$
v_{long}	bei 0°C	: $3450 \text{ m/sec} \pm 3\%$

Werte eventuell systematisch um 2-3% zu klein, bezogen auf Geschwindigkeiten im Kontinuum.

Abhängigkeit der long. Schallgeschwindigkeit von Stress in Schallrichtung:

$$\text{ca. } 4,7 \frac{\text{m/sec}}{\text{kp/cm}^2} \quad \text{bei ca. } -2,5^\circ\text{C.}$$

Elastizitätsmodul:

$$\text{bei } 0^\circ\text{C} \quad E = 8,9 \cdot 10^{10} \cos = 910 \frac{\text{kp}}{\text{mm}^2}$$

$$\text{bei } -10^\circ\text{C} \div -25^\circ\text{C} \quad E = 9,6 \cdot 10^{10} \cos = 980 \frac{\text{kp}}{\text{mm}^2}$$

Linearer Temperatúrausdehnungskoeffizient zwischen 0 und -30°C :

$$\text{ca. } 1,7 \cdot 10^{-5}$$

Tabelle 1

Probe	Zahl der Messungen	Druckbereich kp/cm^2	Temperatur $^\circ\text{C}$	Änderung der Geschwindigkeit $\frac{\text{m/sec}}{\text{kp/cm}^2}$
I	4	0,8 – 5,7	– 2,6	$8,2 \pm 4,8$
II	5	3,5 – 11,7	– 2,4	$7,1 \pm 0,8$
II	5	3,5 – 11,7	– 2,4	$4,8 \pm 2,6$
III	4	3,5 – 8,2	– 2,7	$11,2 \pm 1,4$
III	7	1,2 – 12,8	– 2,6	$1,1 \pm 0,7$

$$\text{Mittelwert: } 4,7 \pm 1,8 \frac{\text{m/sec}}{\text{kp/cm}^2} \quad \text{bei } -2,5^\circ\text{C.}$$

Die Anregung zur Untersuchung der Temperatur- und Druckabhängigkeit der Schallgeschwindigkeit von Eis in der vorbeschriebenen Weise geht auf Herrn Prof. Dr. B. Brockamp zurück, der ebenfalls die Leitung der Versuche innehatte.

Literatur

- [1] Baule, H.: Laufzeitmessungen an Bohrkernen und Gesteinsproben mit elektronischen Mitteln. Geophysical Prospecting 1. No. 2. 1953.