

Volumenvergrößerung von Sedimentgesteinen bei Wassersättigung

G. Buntebarth, Geophysikalisch-Technisches Büro, Burgstätter Str. 6, 38678 Clausthal-Zellerfeld

Die thermische Ausdehnung von Sedimentgesteinen ist eine wenig untersuchte physikalische Eigenschaft, obwohl die Gesteine auch in der obersten Erdkruste sehr unterschiedlichen Temperaturen ausgesetzt sein können und damit die Auswirkung der Dilatation von großem Interesse ist. Entweder dehnt sich das Gestein aus oder es bauen sich Spannungen auf, wenn das Material unter hohem Druck steht. Spannungen bauen sich auch dann auf, wenn Gesteine mit unterschiedlichen Ausdehnungskoeffizienten Temperaturvariationen unterliegen.

Neben der thermischen Ausdehnung unterliegen die Gesteine auch der Feuchtigkeitsdehnung. Sie tritt auf, sobald ein trockenes Gestein mit Wasser in Berührung kommt. Bei Trocknung ist diese Art der Dilatation wieder zurückzuführen auf den Ausgangszustand. Die Feuchtigkeitsdehnung ist reversibel und wiederholbar.

Die Bindungskräfte zwischen Wasser und Gesteinsmatrix sind groß genug, dass das Gesteinsgefüge soweit gedehnt wird, dass die Volumenvergrößerung gut feststellbar ist. Der Mechanismus kann von verschiedener Art sein. Er ist bedingt durch die Adhäsion, Kapillarität, Oberflächenspannung, Grenzflächenspannung und den Einbau von Wasser ins Kristallgitter. Diese Kräfte tragen mit unterschiedlichen Beiträgen zur gesamten Volumenänderung bei. Die Bindungskräfte sind sicherlich stark temperaturabhängig, weil sich die o.g. Eigenschaften des Wassers mit der Temperatur stärker ändern als die der Gesteinsmatrix. Die Wasseraufnahme, d.h. der Sättigungsprozess ist zeitabhängig und hängt überdies nicht nur von der Zusammensetzung des Gesteins ab, sondern auch von der Beschaffenheit des Porenraums, seiner Permeabilität und Porosität. Aus diesem Grund reagieren verschiedene Gesteine sehr unterschiedlich bei Wasseraufnahme.

Als zeitabhängiger Vorgang eignen sich die Methoden der Thermodynamik irreversibler Prozesse zur analytischen Beschreibung der Feuchtigkeitsdehnung. Der nachfolgende Ansatz wird aus Vereinfachungsgründen mit nur der adhäsiven Bindung von Wasser, d.h. der Haftspannung gemacht, die sich aus der Differenz von Oberflächenspannung und Grenzflächenspannung ergibt:

$$\sigma_{s,f} = \sigma_s - \gamma_{s,f}$$

Das Volumen ist dann davon, vom Druck und von der Temperatur abhängig. Das totale Differential ist somit:

$$dV = \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_{p,s} dT + \left(\frac{\partial V}{\partial p} \right)_{T,s} dp + \left(\frac{\partial V}{\partial s} \right)_{p,T} ds \quad (1)$$

Zur Übersichtlichkeit wird nachfolgend die Haftspannung ohne Indices (σ) geschrieben. Der thermische Ausdehnungskoeffizient unter isobaren Bedingungen (α) errechnet sich aus Gl.(1) zu:

$$\left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_p = \left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_{p,\mathbf{s}} + \left(\frac{\partial V}{\partial \mathbf{s}}\right)_{p,T} \left(\frac{\partial \mathbf{s}}{\partial T}\right)_p \quad (2)$$

$$\alpha = \alpha_\sigma + \alpha_i$$

Er enthält zwei Anteile, nämlich den Quasigleichgewichtskoeffizient α_σ und den durch die innere Variable bestimmten Anteil α_i , der zeitabhängig ist.

Weil T und σ unabhängige Variable und explizite Funktionen der Zeit sind, folgt

$$a_i = \left(\frac{\partial V}{\partial \mathbf{s}}\right)_{p,T} \frac{d\mathbf{s}/dt}{dT/dt} \quad (3)$$

Zwei Grenzfälle der Gl. (3) werden hier betrachtet:

1.) Bei einer trockenen Probe und im Vakuum ist

$$\frac{d\mathbf{s}}{dt} = 0 \quad \text{und somit} \quad a^* = a_{\mathbf{s}}^* \equiv \frac{1}{V} \left(\frac{dV}{dT}\right)_{p,\mathbf{s}} \approx \frac{3}{L} \left(\frac{dL}{dT}\right)_{p,\mathbf{s}}$$

Dies ist der allgemein bekannte thermische Volumenausdehnungskoeffizient, der bei Festkörpern aus der relativen Längendehnung (dL/L) bestimmt wird.

2.) Bei nahezu konstanter Temperatur kann nach Gl.(3) die Zeitabhängigkeit untersucht werden. Es ist dann

$$\frac{d\mathbf{s}}{dt} \gg \frac{dT}{dt} \quad a \Rightarrow a_i$$

Die maximale Volumenvergrößerung beträgt nach Gl.(1) unter isobaren Bedingungen:

$$\int_{V_0}^{V_0 + \Delta V_m} dV = \Delta V_m = \int \left(\frac{dV}{dT}\right)_{p,\mathbf{s}} dT + \int_{\mathbf{s}_0}^{\mathbf{s}^*} \left(\frac{dV}{d\mathbf{s}}\right)_{T,p} d\mathbf{s}$$

$$\equiv 0 = c \int_0^{\infty} \mathbf{a}_i^{(T)}(t) dt$$

Es ist zu erwarten, dass die Haftspannung in einem Gestein von zahlreichen Parametern beeinflusst wird:

$$s_{s,f} = s_{s,f}(s, ds/dt, dT/dt, h, \Phi, c_{tm})$$

und daher sind die experimentellen Ergebnisse in Abhängigkeit vom Sättigungsgrad (s), von der Temperatur (T), der Zeit (t), der Permeabilität (η) und Porosität (Φ) und vom Tonmineralanteil sowie seiner Zusammensetzung (c_{tm}) zu untersuchen.

Experimentelle Ergebnisse werden mit Untersuchungen an zwei Proben demonstriert, die zum einen die einaxiale Feuchtigkeitsdehnung des wenig zementierten Oberkirchener Sandsteins und zum anderen die eines Tonsteins aus dem Ruhrkarbon zeigt. Die Zunahme des Volumens ist nicht-linear und nähert sich asymptotisch einem Maximalwert. Beim untersuchten Sandstein beträgt die maximale Volumenvergrößerung nach Sättigung etwa $\Delta V = 0,02\%$ und wird nach Abb.1 schon nach wenigen Minuten erreicht. Die Feuchtigkeitsdehnung beim Tonstein kann sich hingegen über viele Tage erstrecken und kann sogar $\Delta V = 3\%$ erreichen. Abb.2 zeigt eine von $\Delta V = 1,5\%$ auf.

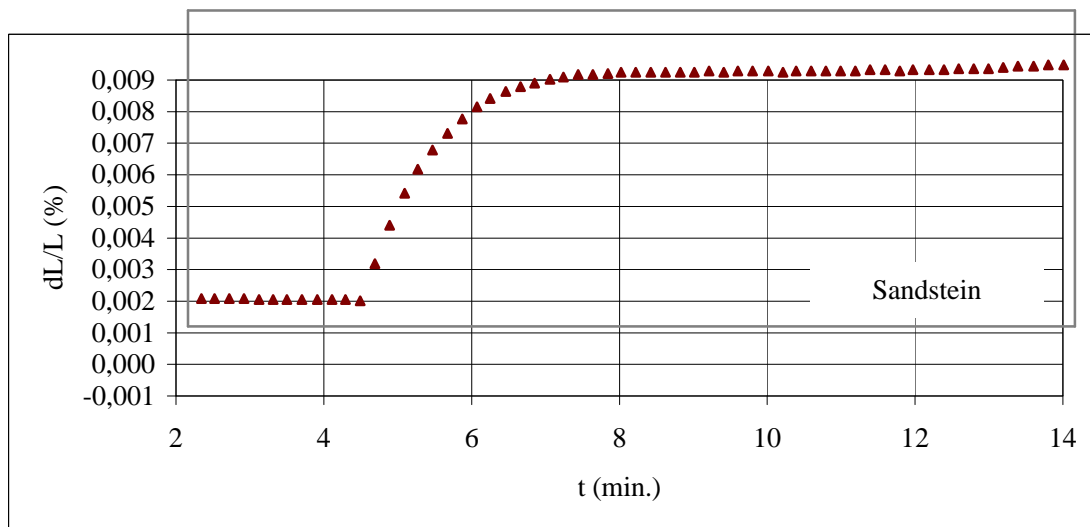


Abb. 1: Feuchtigkeitsdehnung einer Oberkirchener Sandsteinprobe nach Sättigung bei Raumtemperatur und zur Zeit $t = 4,3$ Minuten.

Die temperaturabhängige Längenänderung einer gesättigten Probe ist in Abb. 3 wiedergegeben. Die Überlagerung der reinen Matrixeigenschaft und der zeitabhängigen inneren Variablen zeigt eine deutliche Änderung der Anteile aus den beiden Mechanismen bei ca. $70 - 80\text{ }^\circ\text{C}$, wo sich die Länge trotz Temperaturzunahme nur unwesentlich ändert. Der thermischen Ausdehnung wirkt offensichtlich die Rückführung der Feuchtigkeitsdehnung entgegen. Noch deutlicher ist der Einfluss der Feuchtigkeitsdehnung in Abb. 4 erkennbar. In einer lufttrockenen Tonsteinprobe findet unterhalb von $70\text{ }^\circ\text{C}$ keine deutliche Längenänderung statt (Abb. 4: untere Kurve „1. Messung“). Erst mit weiter steigender Temperatur steigt auch der Gradient der Dilatation und erreicht oberhalb von $80\text{ }^\circ\text{C}$ ein Maximum. Wird dieselbe Probe nach Abkühlung erneut erwärmt, zeigt Abb. 4 die fehlende Retardation. Die Längendehnung setzt nach vorausgegangener Behandlung bei über $100\text{ }^\circ\text{C}$ sofort mit der Erwärmung ein.

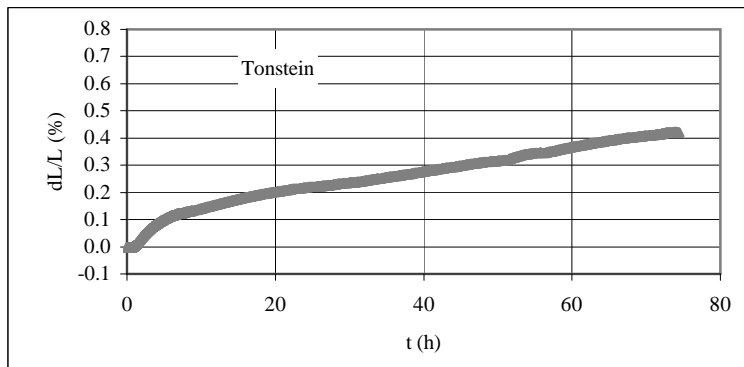


Abb. 2: Feuchtigkeitsdehnung einer Tonsteinprobe aus dem Ruhrkarbon nach Sättigung bei Raumtemperatur

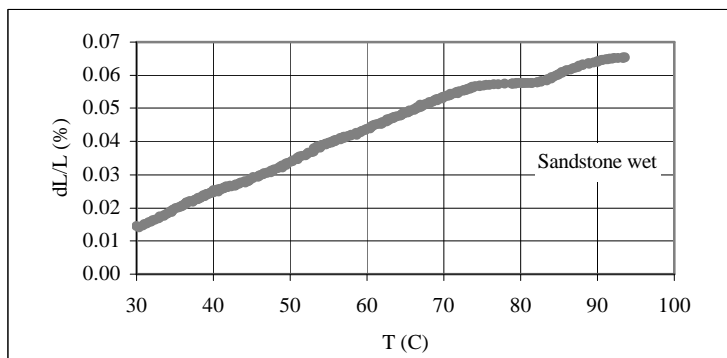


Abb. 3: Relative thermische Ausdehnung einer gesättigten Oberkirchener Sandsteinprobe

Auswirkungen der Feuchtigkeitsdehnung sind überall dort zu beobachten, wo Bauten als Gebäude oder Denkmale aus Naturstein der wechselhaften Witterung mit Trocknung und Sättigung unterliegen und das Gefüge lockern bis es zerfällt. Aber auch Untertagekonstruktionen wie Stollen im Bergbau und Kavernen können sich in unterschiedlichem Maß dehnen, führen zu Rissen und stürzen ein. Der Fluidaustausch in Speichergesteinen ist ebenso stark von der zeitabhängigen Dehnung betroffen und kann zu unvorhergesehenen Effekten führen.

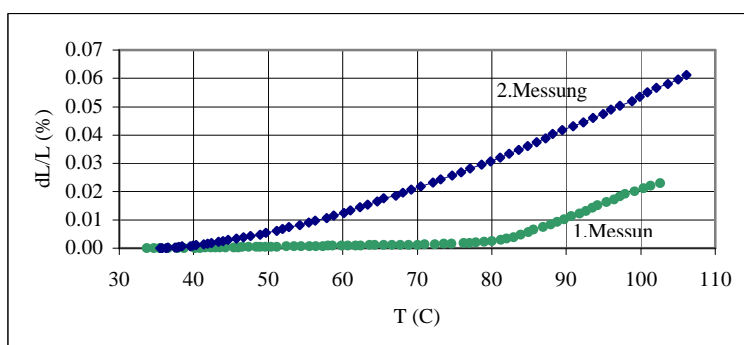


Abb. 4: Relative thermische Ausdehnung einer lufttrockenen Tonsteinprobe aus dem Ruhrkarbon

Literatur:

Kammer, H.-W. & K. Schwabe (1985): Thermodynamik irreversibler Prozesse, Weinheim (VCH Verlagsgesellschaft), 114 S.