

Zusammenhänge zwischen der Benetzung poröser Medien und ihrer Volumenänderung

G. Buntebarth & A. Weller, Institut für Geophysik der TU Clausthal

Die untersuchten Objekte sind sowohl Gesteine als auch Borosilikatfilter, die Porositäten zwischen 1 % und über 40 % aufweisen. Der Porenraum ist dabei in unterschiedlich komplexer Weise aufgebaut, bildet aber ein kommunizierendes Kapillarsystem. Wird ein solches Medium von einer benetzenden Flüssigkeit umgeben, bewirkt die Kapillarkraft, dass sich das Fluid ins Innere des Mediums ausbreitet und zwar so weit ins Innere bis der sich aufbauende Druck im eingeschlossenen Gasvolumen den Kapillardruck kompensiert. Der Kapillardruck wirkt senkrecht zur Oberfläche des Mediums nach innen, ist bei Eintritt des Fluids am größten und nimmt mit dem sich aufbauenden Gegendruck ab bis zur vollständigen Kompensation. Der Kapillardruck wirkt wie ein auf das Medium aufgebrachter hydrostatischer Druck, der bei einer entsprechend hohen Kompressibilität des Mediums zur Volumenminderung führen kann.

Sobald die innere Oberfläche des porösen Mediums vom Fluid benetzt wird, werden die Oberflächenkräfte aktiv. Die Grenzflächenkraft der Matrix wird um so mehr verringert je größer die Oberflächenspannung des Fluids ist, d.h. durch die Verminderung der Kraft, die senkrecht zur Oberfläche der Matrix ins Innere des Festkörpers wirkt, wird die Matrix entlastet und kann sich ausdehnen. Diese Dilatation ist nicht nur materialabhängig, sondern ist auch proportional zur benetzten Fläche.

Beide Volumenänderungen konkurrieren miteinander. Wegen der hohen Inkompressibilität der meisten Medien dominiert in der Regel die Dilatation. Als Beispiele werden für die Dilatation ein anisotropes Sedimentgestein (Abb. 1) und für die Schrumpfung ein wenig verfestigter Sandstein (Abb. 2) gezeigt.

Die Dilatation ist von der Größe der benetzten Oberfläche abhängig und somit sind der Sättigungsgrad wie auch die Größe der spezifischen inneren Oberfläche einflussreiche Größen. Weiterhin spielt die Oberflächenspannung des Fluids eine wichtige Rolle, die dazu führt, dass die Dilatation um so größer ist, je größer seine Oberflächenspannung ist.

Die Komplexität der Porenraumstruktur erschwert seine quantitative Berücksichtigung in der Bestimmung physikalischer Poreneigenschaften. Es gibt daher viele Versuche, durch unterschiedliche Raummodelle adäquate mittlere effektive Poreneigenschaften zu beschreiben. Es liegt daher nahe, zur Beschreibung der Vorgänge die Methoden der irreversiblen Thermodynamik nutzen. Aus der Analyse von Messungen der linearen Dehnung bei konstanter Temperatur werden zahlreiche Parameter ermittelt, die von den Matrixeigenschaften abhängen, von der Zementation der

Mineralkörner, vom Sättigungsgrad des Porenraums, von der Struktur des Porenraumes und hauptsächlich von der Oberflächenspannung des Fluids.

Zahlreiche Gesteine werden untersucht, die ergeben, dass Sedimentgesteine mit nichtquellfähigen Tonmineralen nach wenigen Minuten ein Maximum der Dehnung erreichen und nach Trocknung auf die Ausgangsgröße schrumpfen. Das gleiche Verhalten zeigen gesinterte Glasfilter. Kristalline Gesteine mit sehr geringer Porosität, d.h. mit sehr niedriger Permeabilität erreichen das Maximum der Dehnung erst nach Stunden.

Der Vorgang von Benetzung und Trocknung ist reversibel. Am Elbsandstein des Dresdner Zwingers kann verdeutlicht werden, dass der ständige Wechsel von Regen und Sonnenschein bei einer relativ großen maximalen Dehnung des Gesteins schnell zur Verwitterung führt.

Wird eine poröse Probe unter Atmosphärendruck von einem Fluid plötzlich umgeben, wird eine neue Fluidoberfläche geschaffen, die in den Porenraum eintritt. An der Grenzschicht zwischen z.B. Wasser und Luft bildet sich sogleich eine Wasserdampfschicht aus, die der Umgebung die Verdampfungswärme entzieht. Folglich kühlt sich zuerst der Porenraum mit der gemeinsamen Grenzfläche von Gas und Wasser ab. Der eingeschlossene Luftraum wird jedoch durch den Kapillardruck bis zum Druckausgleich komprimiert, und die Druckzunahme bewirkt entsprechend der allgemeinen Zustandsgleichung eine Erwärmung des Gasvolumens. Diese beiden Vorgänge lassen sich beobachten, wenn die Porosität und die spezifische innere Oberfläche groß sind. Abb. 3 zeigt einen solchen porösen Körper (Glasfilter Nr.5, Fa. ROBU), wo bei Wassereintritt eine Abkühlung im Porenraum beobachtet wird mit einer anschließenden Erwärmung. Die Vorgänge dauern nur kurze Zeit an. Die Erwärmung ergibt eine Druckabschätzung nach der allgemeinen Zustandsgleichung von ca. 0,5 bar, und daraus ergibt sich ein effektiver Porenradius von $r = 2,8 \mu\text{m}$, wenn vollständige Benetzung angenommen wird, d.h. bei sehr kleinem Kontaktwinkel zwischen Matrix und Fluid.

Ist der Porenraum klein wie bei den meisten Gesteinen, dissipiert die Kompressionswärme wegen der geringen Wärmekapazität so schnell, dass sie mit dem benutzten Thermoelement nicht nachweisbar ist. Die Abkühlung ist hingegen aufgrund der großen Verdampfungswärme des Wassers unmittelbar nach Wassereintritt deutlich. Der Temperatúrausgleich erfolgt innerhalb weniger Zehner Sekunden (Abb. 4).

Literatur:

Buntebarth, G., A. Péntek & A. Weller, Thermal and humidity dependent expansion of rocks, Poster, GEFTA-Tagung, 2014, Berlin.

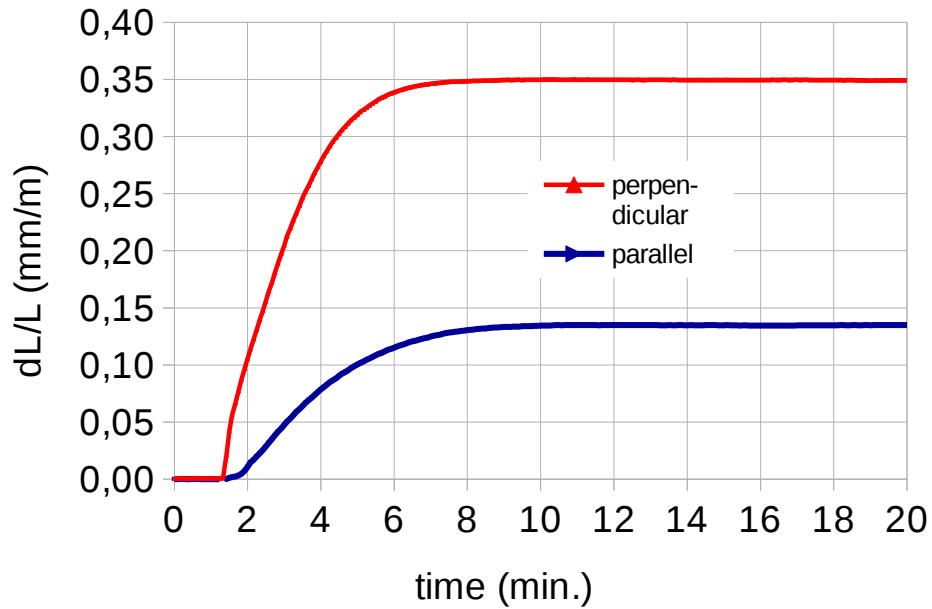


Abb. 1: Dilatation des Elbsandsteins senkrecht und parallel zur Schichtung nach Sättigung unter Atmosphärendruck bei $t = 1,5$ Minuten (Buntebarth et al. 2014)

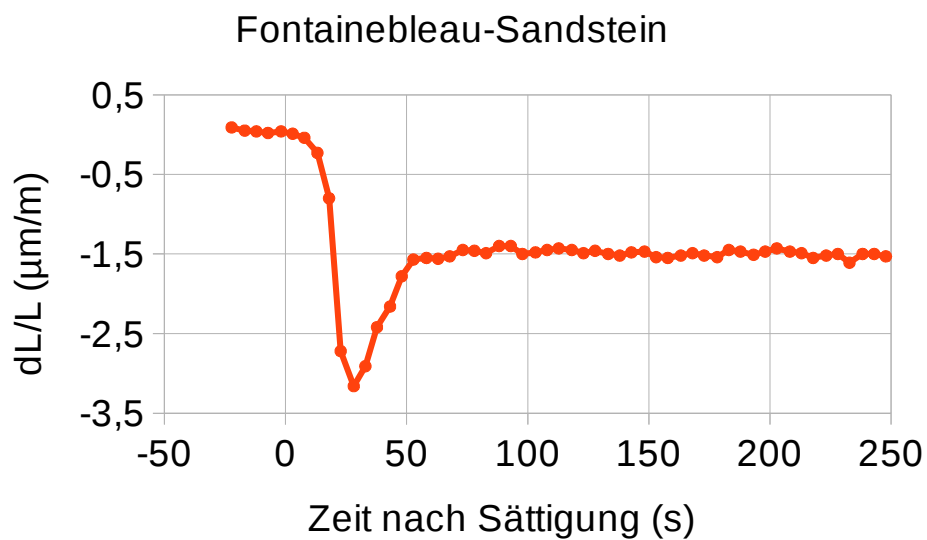


Abb. 2: Schrumpfung eines wenig verfestigten Sandsteins nach Sättigung unter Atmosphärendruck

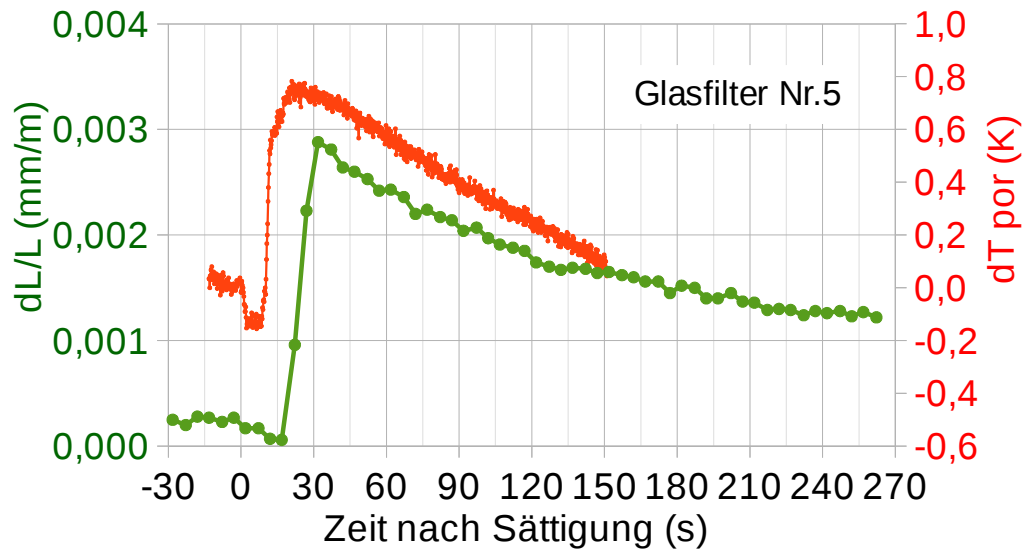


Abb. 3: Temperaturverlauf im Porenraum eines Glasfilters nach Sättigung unter Atmosphärendruck sowie die Dilatation der Probe

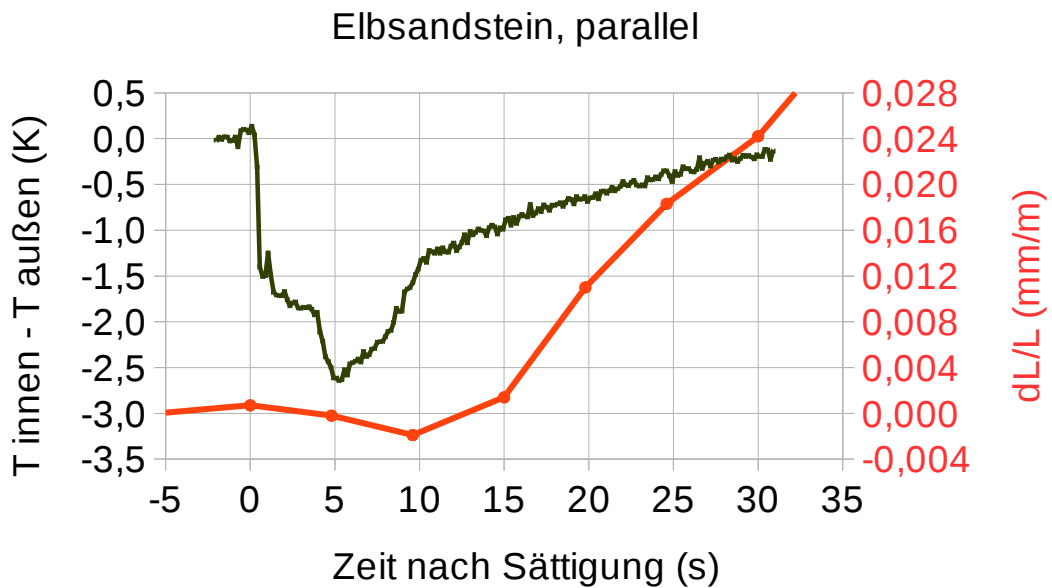


Abb. 4: Temperaturverlauf im Porenraum eines Sandsteins nach Sättigung unter Atmosphärendruck sowie die Dilatation der Probe parallel zur Schichtung