

## **Das Messen von Fluiddrücken in gesättigten und teilgesättigten Böden**

PD Dr.-Ing. Eugen Perau, Dipl.-Ing. Susanne Potthoff

### **1 Einführung**

Dieser Beitrag befasst sich mit der Messung von Luft- und Wasserdrücken in Böden und zielt vornehmlich auf die Interpretation von Fluiddrücken in teilgesättigten Böden. Teilgesättigte Böden bestehen aus den drei Phasen Korngefüge, Wasser und Luft. Vorn an steht die Interpretation von mechanischen Größen im bodenmechanischen Sinne, das heißt in letzter Konsequenz die Zusammenführung von Theoretischer Mechanik und praktisch durchgeführten Messungen. Ohne eine solche Interpretation ergäben Messungen in der Bodenmechanik keinen tieferen Sinn; entsprechende Versuche hätten den Status von Indexversuchen in der Art von Wassergehalten an Fließ- und Ausrollgrenze nach Casagrande.

In der Hydromechanik, der Geotechnik, in der Lagerstättenkunde wie in der Bodenkunde ist häufig von Drücken verschiedenster Art die Rede. Bei Fluiden – wie Wasser oder Luft – in Böden werden in diesem Zusammenhang Begriffe wie Porenwasserdruck, Wasserdruck, Luftdruck, Saugspannung, Kapillarspannung, Matrixpotential, usw. verwendet, die allesamt mit großer Selbstverständlichkeit nebenher und auch teilweise durcheinander benutzt werden. Zum einen liegt diese mitunter problematische Tatsache daran, dass sich die unterschiedlichen Disziplinen naturgemäß für unterschiedliche Fragestellungen interessieren, zum anderen aber auch daran, dass sich selbst innerhalb der Disziplinen grundverschiedene Herangehensweisen an ein und dieselbe Fragestellung ausgeprägt haben. Auch aus diesem Grunde erscheint die Zusammenführung von Ideen aus der "Theoretischen Bodenmechanik" mit Aspekten der praktischen Durchführung und Interpretation von Messungen geboten.

### **2 Teilgesättigte Böden**

Bevor Messungen bei teilgesättigten Böden gedeutet werden können, erscheint es an dieser Stelle wichtig, den Begriff "teilgesättigte Böden" genauer zu fassen. Im Sinne der Kontinuumsmechanik soll es sich um einen grundsätzlich deformierbaren porösen

Festkörper handeln, dessen durchgängigen Poren mit zwei Fluiden gefüllt sind, welche sich grundsätzlich frei bewegen können. Aus Sicht der Geotechnik handelt es sich bei dem Festkörper um ein Gefüge aus Körnern, die mehr oder weniger groß und mehr oder weniger dicht gelagert sind, bei den Fluiden handelt es sich um das nahezu inkompressible Wasser und die Luft als kompressibles Gas. Wichtig dabei ist, dass unabhängig von der Erscheinungsform der Luft – frei oder im Wasser gelöst – diese sich grundsätzlich frei, jedoch nach gewissen Gesetzmäßigkeiten bewegen kann. Dies ist für die Berechnung der Luftströmung, wie sie zum Beispiel beim unter Druckluft vorgetriebenen Tunnel auftritt, unerlässlich. In speziellen Fällen (vgl. z.B. die Untersuchung des Porenwasserdrucks unter Deckwerken von Köhler, 1996) mag angesichts geringer Luftgehalte die Luft zum Beispiel im Wasser gelöst sein. Das mechanische Modell enthält dann statt zweier Fluide nur ein Fluid, und zwar das Wasser als ein kompressibles Fluid in den Poren.

Ein anderer Spezialfall liegt bei der Versickerung von Niederschlägen vor (vgl. auch die Gleichungen von Dathe/Dieckkrüger, 1996), hier muss die Luft nicht unbedingt bilanziert werden. Wieviel Luft wann wohin strömt, ist hier letztlich relativ gleichgültig und bleibt deshalb als Ergebnis von Berechnungen zurecht unberücksichtigt. Dennoch erscheint die vollständige "Vernachlässigung" der Luft auch hier nicht unbedingt angebracht.

### **3 Beschreibung von Strömungen**

Die Drücke von Luft und Wasser im Boden zu messen und richtig zu interpretieren stellt für die Beschreibung von Strömungen in Böden eine wichtige Grundlage dar, weil es vor allem die Gradienten dieser Drücke sind, die für den Strömungsprozess verantwortlich zeichnen. Um die Art der Messung von Drücken und deren Interpretation an dieser Aufgabe orientierten zu können, muß hier zunächst die Beschreibung von Strömungen behandelt werden.

Was die Beschreibung der Strömung von Luft und Wasser in Böden angeht, lassen sich vier verschiedene Herangehensweisen benennen:

- ① die an konkreten praktischen Aufgaben orientierten Arbeiten
- ② die an bodenmechanischen Experimenten orientierten Arbeiten
- ③ die an klassischen Gleichungen orientierten Verfahren
- ④ die an der Mechanik orientierte Beschreibung

Bei den *an konkreten praktischen Aufgaben orientierten Arbeiten*, ① (z.B. Kramer/Semprich, 1989 oder Köhler 1996) werden für den speziellen Anwendungsfall (z.B. Druckluftvortrieb im Tunnelbau oder Kanaldeckwerke) Gleichungen für die gesuchten Größen (z.B. Druckluftverbrauch beim Tunnelbau oder Porenwasserdruck) aufgestellt. Diese Gleichungen orientieren sich vornehmlich an Erfahrungswerten und zum Teil auch an Großversuchen.

Eine derartige Herangehensweise führt zu *direkten Lösungen für ein spezielles System*, meistens in Form von direkt anwendbaren Näherungsformeln. Problematisch ist hier bereits die Übertragbarkeit auf ähnliche Problemstellungen, z.B. bei Bodenverhältnissen, die von den untersuchten abweichen. Unmöglich ist die Übertragung der Näherungsformeln auf andere Problemstellungen, d.h. andere Systeme, selbst dann, wenn tatsächlich ähnliche Vorgänge stattfinden.

Der Vorgehensweise, sich *an bodenmechanischen Experimenten zu orientieren*, ② (z.B. Bachmann, 1998, van Genuchten, 1980) bedient sich ein wesentlicher Teil der Wissenschaftler aus der Bodenkunde. Es werden in der Regel Versuche an *Bodenproben* durchgeführt. Mit dem Ziel, Bodeneigenschaften (z.B. Durchlässigkeiten oder Saugspannungs-Sättigungskurven) zu bestimmen, werden dabei verschiedene Größen gemessen und aufgetragen, die Messwerte zu Kurven verbunden und die Kurven mathematisch beschrieben. So gelangt man zu Gleichungen, die zweifellos etwas mit dem Verhalten des Bodens zu tun haben; jedoch bleibt unklar, inwieweit diese Bodeneigenschaften auch unter anderen Konditionen gültig sind. So gelten zum Beispiel die von van Genuchten (1980) aufgestellten Saugspannungs-Sättigungsbeziehungen nur im Schwerfeld der Erde (Perau/Richwien, 1998) und unter quasistatischen Bedingungen (Perau, 2001b). Das mag zwar den Praktiker bei gängigen geotechnischen oder landwirtschaftlichen Fragestellungen gar nicht stören, sollte jedoch beim Anwender grundsätzlich zu größerer Skepsis führen, als es dies gemeinhin tut. Die Frage muss erlaubt sein: "Was mag denn noch alles an Restriktionen *latent* vorhanden sein!"

Bei den *an klassischen Gleichungen orientierten Verfahren*, ③ (z.B. Gülzow, 1994 oder Dathe/Diekkrüger, 1996). bestehen die Gleichungssysteme zur Beschreibung von Strömungen aus Differentialgleichungen, die auf Problemstellungen im dreidimensionalen Kontinuum anwendbar sind. Hier wird bereits Materialverhalten des Bodens im erweiterten

Sinne beschrieben, so dass entsprechende Gleichungen allgemeiner anwendbar sind, z.B. auf die Versickerung von Niederschlägen (ohne dabei die Luft zu bilanzieren) oder die Beschreibung der Luftströmung beim Tunnelvortrieb unter Druckluft.

Einzelne Gleichungen orientieren sich hier aber an Messergebnissen, ohne diese Messungen und vor allem die daraus abgeleiteten Theorien (z.B. van Genuchten, 1980) zu hinterfragen.

Das Vorgehen bei Dathe/Diekkrüger (1996) zum Beispiel lässt sich so durch nachstehende Abfolge charakterisieren: a) verschiedene einschlägige vorhandene Gleichungen aufspüren, b) Zusammenhänge einiger Größen, die darin vorkommen, im Sinne von ② messen, c) weitere Beziehungen zwischen den Messgrößen suchen bis die Anzahl von Gleichungen und Unbekannten ausgewogen ist, so dass letztlich d) ein System von Gleichungen vorliegt, das numerisch gelöst werden kann.

Grundlage der *an der Mechanik orientierten Beschreibung* der Strömung von Luft und Wasser in Böden, ④ (vgl. z.B. Perau, 2001b) ist die "Theorie poröser Medien". Mit dieser Theorie werden Kontinua mit mehreren Komponenten beschrieben. Sie ist das Werkzeug zur Beschreibung der Interaktion von mehreren Phasen, in unserem speziellen Fall die Phasen des Bodens (Korngefüge, Wasser und Luft). Die Theorie poröser Medien besitzt den Vorzug, für verschiedenste Arten von Mehrphasenkontinua anwendbar zu sein, sie könnte also auch eine Art gemeinsame Sprache für alle Disziplinen sein, die sich mit Strömungsproblemen befassen. Leider wird diese Theorie jedoch erst seit kurzer Zeit konsequent auf bodenmechanische Fragestellungen angewendet (vgl. z.B. Perau, 2001b, Tamáskovics, 2001).

Diese aus der Mechanik stammende Theorie wurde selbst von wissenschaftlich tätigen Bodenmechanikern bisher mehrheitlich als eine geschlossene und für den geotechnischen und bodenkundlichen Anwender abgeschottete Welt von Formeln und Gedanken gesehen, die mit der Welt der Anwender und Versuchstechniker aus Geotechnik und Bodenkunde kaum in Interaktion tritt.

Nicht nur für die Interpretation von Druckmessungen jedoch erscheint es uns eine dringliche Aufgabe, diese beiden Welten zusammenzuführen - vor allem auch um das Wissen der Mechanik für die anwendungsorientierten Fächer zu erschließen. Die logische Struktur der "Theorie poröser Medien" sollte bei der Neuordnung von Begriffen vor allem für die Mechanik der teilgesättigten Böden als Massstab und Orientierung dienen.

#### 4 Theorie poröser Medien

Grundlagen für die Interpretation und damit letztlich auch für die Durchführung von Messungen von Fluiddrücken in Böden sollen nun auf Basis der zuvor unter ④ geschilderten Herangehensweise mit der Theorie poröser Medien formuliert werden.

In einem einfachstmöglichen mechanischen Modell besteht der Boden aus drei Phasen: dem festen Korngefüge, dem flüssigen Wasser und der gasförmigen Luft. Die einzelnen Phasen werden dabei im Sinne der makroskopischen Betrachtung überlagert, so dass nicht mehr entscheidbar ist, an welcher Stelle genau sich welche Phase befindet.

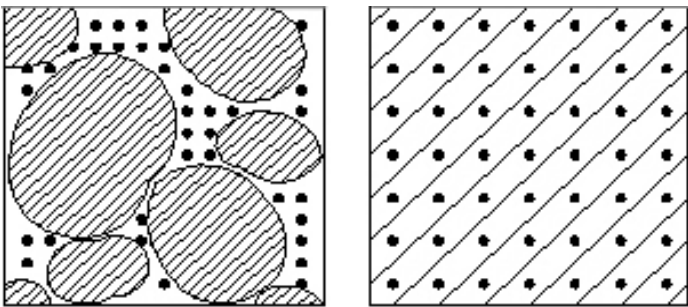


Abb. 1 Mikroskopisches (links) und makroskopisches Modell

Diese Überlegung ist für die Interpretation von Drücken von Bedeutung. Für kontinuumsmechanische Gleichungen sind nämlich letztlich nur makroskopische Größen von Belang. Die Messung mikroskopischer Größen bedürfen einer – nicht besonders einfachen – Interpretation. Weitere Überlegungen und Einzelheiten zu den Grundlagen finden sich in Perau (2001a).

Die rationale Mechanik (vgl. z.B. Perau, 2001b und darin zitierte Literatur) setzt die Gültigkeit verschiedener Gleichungen, wie die der Erhaltung von Masse, Bewegungsgröße und Energie voraus. Um das mechanische Verhalten eines spezifischen Stoffes zu beschreiben, sind zwischen den einzelnen physikalischen Größen zusätzliche Beziehungen aufzustellen, so dass die Anzahl von Variablen und Gleichungen letztlich identisch ist. Diese zusätzlichen Gleichungen sind die konstitutiven Beziehungen.

#### 5 Konstitutive Beziehungen für die Spannung eines Fluids

Legen wir in einem ersten Schritt ein Kontinuum zugrunde, das nur aus *einem* Fluid, also zum Beispiel Wasser oder Luft, besteht. Hier ist lediglich *eine* konstitutive Beziehung für

den Spannungstensor zu formulieren. Dieser kann zum Beispiel von der Dichte, der Temperatur oder dem Geschwindigkeitsgradienten abhängen. Die einfachstmögliche konstitutive Beziehung ist die eines *idealen Fluids*. Der Spannungstensor dieses Fluids sieht dann folgendermaßen aus:

$$\underline{\mathbf{T}}_F = -p_F \cdot \underline{\mathbf{I}} = \begin{bmatrix} -p_F & 0 & 0 \\ 0 & -p_F & 0 \\ 0 & 0 & -p_F \end{bmatrix} \quad (1)$$

Die Schubspannungen sind null und die Normalspannungen in allen Richtungen gleich. Alle Richtungen sind auch Hauptspannungsrichtungen mit dem Hauptwert  $-p_F$ , wobei  $p_F$  positiv ist. Nur bei einem derartigen Spannungszustand kann wirklich von einem "Druck" die Rede sein.

Es gehört zu der konstitutiven Beziehung für den Spannungstensor, auch den Druck  $p_F$  in Abhängigkeit der konstitutiven Variablen zu bestimmen. Wir kennen für Gase zum Beispiel das Boyle-Mariottesche Gesetz, das den Druck von der Dichte  $\rho_F$  und der absoluten Temperatur  $T$  [K] abhängig macht:

$$p_F = \rho_F \cdot R \cdot T \quad (2)$$

Für Luft beträgt diese Konstante  $R$  bekanntlich etwa  $287 \frac{\text{N} \cdot \text{m}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$ .

Hier zeigt sich, dass es sich bei  $p_F$  um einen *absoluten* Druck handeln muss, der nicht als "Überdruck", also Differenz zum atmosphärischen Luftdruck verstanden werden darf. In unserer Atmosphäre beträgt  $p_F$  also etwa 1013 hPa. Es empfiehlt sich demnach, unter "Druck" stets den *absoluten Druck* zu verstehen.

Bei einem inkompressiblen Fluid – als solches beschreiben wir in der Geotechnik das Wasser – ist  $p_F$  nicht konstitutiv festlegbar und muß aus einer Randbedingung bestimmt werden.

Als ideale Fluide behandeln wir zum Beispiel Luft bei Problemen der Schallausbreitung oder auch Wasser in Böden. In der Hydromechanik wird Wasser aber nicht als ideales Fluid sondern als *Newtonsches Fluid* beschrieben. Diese zeichnen sich durch einen linearen Zusammenhang zwischen den Schubspannungen innerhalb des strömenden Fluids und den Komponenten des Geschwindigkeitsgradienten quer zur Strömungsrichtung aus (Bear, 1972):

$$\tau_{yx} = \eta_F \frac{\partial v_x}{\partial y} \quad (3)$$

Die Proportionalitätskonstante zwischen Schubspannung und Geschwindigkeitsgradient ist die dynamische Viskosität  $\eta_F$ . Was verallgemeinerte, mechanisch einwandfreie Schreibweisen für diese Beziehung angeht sei z.B. auf Perau (2001a) und die darin zitierte Literatur verwiesen. Die dort wiedergegebene konstitutive Gleichung ergibt zusammen mit den Erhaltungsgleichungen für Masse und Bewegungsgröße bekanntlich die Navier-Stokesche Gleichung zur Beschreibung von laminaren, zähigkeitsbehafteten Strömungen. Eine solche konstitutive Gleichung für den Spannungstensor ist demnach für hydrodynamische Berechnungen Voraussetzung.

## 6 Fluiddruck bei einem Fluid im Boden

Für viele Aufgabenstellungen der Geotechnik ist es wichtig, über Bewegung und Druck des Wassers im Boden bescheid zu wissen. Deshalb widmen wir uns hier dem Wasser, welches hier zunächst als Newtonsches Fluid angesetzt wird.

Wasser spielt in vielen Anwendungsfällen der Geotechnik eine wichtige Rolle. Es erscheint hier meistens im Boden, mitunter aber auch als freistehende oder –strömende Flüssigkeit. Freiströmendes Wasser liegt zum Beispiel vor, wenn Deiche von Wasser überströmt und infiltriert werden. Meistens kann aber in der Geotechnik auch das freiströmende Wasser als statisch angenommen werden. Dieses wird zum Beispiel bei einem Flussdeich der Fall sein, an dem Hochwasser ansteht; das Flusswasser fließt mit vergleichsweise geringer Geschwindigkeit vorüber. Dann verschwindet der Geschwindigkeitsgradient aus (3) näherungsweise und es gilt  $\underline{T}_F = -p_F \cdot \underline{I}$ . Die Zähigkeit als Parameter ist dann uninteressant und die Fluidspannung lässt sich als Druck beschreiben (vgl. z.B. Perau, 2001a).

Bei Wasser als strömendem Fluid im *Boden* vernachlässigen wir die deviatorischen, also die nicht hydrostatischen Anteile, d. h. wir rechnen mit  $\eta_F = 0$  und es ergibt sich ebenfalls  $\underline{T}_F = -p_F \cdot \underline{I}$ . Hier ist  $p_F$  ein Druck, der aus der Summe von "Porenwasserdruck  $u$ " und atmosphärischem Luftdruck  $p_{atm}$  besteht. Das fällt uns in der klassischen Bodenmechanik (*ein* Fluid im Boden) nicht auf, da  $p_F$  nur in einem Gradient (das heißt einer örtlichen Ableitung) in der Bewegungsgleichung auftritt. Da  $p_F$  und  $u$  sich nur durch eine örtlich

konstante Differenz unterscheiden, sind der Gradient vom Wasserdruck  $p_F$  und der vom Porenwasserdruck  $u$  identisch.

Darüber hinaus muss die Frage erlaubt sein: Warum berücksichtigen wir als Geotechnik-Ingenieure die deviatorischen Anteile des Spannungstensors des Wassers im Boden nicht, wo diese doch in der Hydromechanik eine entscheidende Rolle spielen? Die Antwort ist recht einfach: im Unterschied zur Wasserströmung der Hydromechanik wird die Wasserströmung der Geotechnik durch die Widerstandskräfte des Korngefüges gegen diese Strömung dominiert. Diese Widerstandskräfte, die *reactio* auf die "Strömungskräfte", dämpfen die Strömung so stark, dass die deviatorischen Anteile des Spannungstensors in der Bewegungsgleichung vernachlässigbar sind. (vgl. Perau, 2001b).

Dennoch spielt die Zähigkeit des Wassers bei der Durchströmung von Böden eine wichtige Rolle. Dieser Einfluss beim gegenseitigen Durchdringen der Phasen lässt sich mit mikroskopischen Effekten erklären. Er entsteht vor allem dadurch, dass die Fluidteilchen sich um die Körner herum bewegen müssen. Dadurch entstehen örtlich veränderliche Geschwindigkeitsgradienten. Die Geschwindigkeitsgradienten auf *Mikroebene* sind deshalb – mitunter im Gegensatz zu denen auf *Makroebene* – verschieden von  $\underline{0}$ . Wir berücksichtigen diesen Effekt, indem wir die Zähigkeit in die Widerstandskräfte infolge Durchdringung einbeziehen – das entspricht dem Darcyschen Gesetz (Perau, 2001b).

Wie sieht das *Prinzip* der Messung eines Drucks im porösen Medium Boden aus?

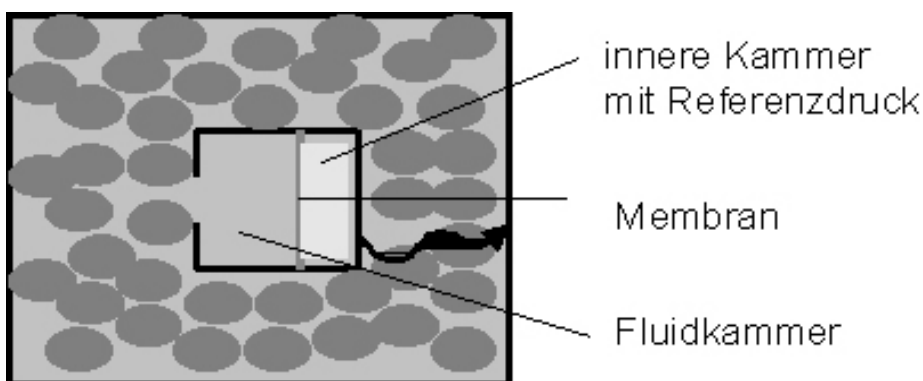


Abb. 2 Messprinzip "Druck eines Fluids im porösen Medium"

Wenn wir einen Fluiddruck im Boden messen, bringen wir an der gefragten Stelle im Boden eine kleine Kammer unter, in die *nur* das Fluid eindringen kann. Diese Kammer



nimmt außen die noch vorhandenen Spannungen des Korngefüges auf. Dadurch wird das Innere der Kammer von der Kraftwirkung des Korngefüges abgeschirmt, so dass nur das Fluid, das von den Poren aus in die Kammer gelangt, eine Kraft auf die an der Kammerrückwand liegende Membran ausüben kann.

Die Verformung der Membran wird dann in eine elektrische Größe umgewandelt, verstärkt und angezeigt. Die Kammer kann auch durch einen Filter realisiert werden - vergleiche das Schwingsaiten-Piezometer, das Fischer (1998) vorgestellt hat. Hier nimmt das Gerüst aus Filtermaterial die mechanischen Einflüsse des Korngefüges, also seine Normal- und Schubspannungen auf, das Wasser dringt durch die Poren des Bodens und den Filter in die Kammer und leitet bei einer kontinuierlichen Phase so seinen Druck an die Membran weiter.

Der absolute Druck, den wir suchen, ergibt sich aus der Summe des so gemessenen Drucks und dem Druck, der auf der anderen Seite der Membran wirkt; das kann der atmosphärische Luftdruck sein - aber auch jeder andere bekannte und konstante Druck. Einen Sinn ergibt ein derartiges Verfahren jedoch nur mit einer entsprechend abschirmenden Kammer, die zudem auch hinreichend klein sein muss. Ansonsten würde sie den Strömungsprozess selber beeinflussen indem sie eine Art Kurzschluss bewirkt.

## **7 Drücke bei zwei Fluiden im porösen Medium**

Die Beschreibung des mechanischen Verhaltens von zwei Fluiden in einem porösen Medium ist weitaus schwieriger als die *eines* Fluids in einem porösen Medium (vgl. auch Gülzow, 1994). Hier treten zusätzliche Phänomene auf, wie zum Beispiel die Kapillarität oder die Kapillarkohäsion des Bodens. Selbst unter Annahme eines starren, unverformbaren Korngefüges sind die Wechselwirkungen zwischen den beiden Fluiden und dem Korngefüge vielfältiger Art und hängen sehr von der Art des Bodens und speziell von der Größe und Form seiner Poren ab. So verwundert es nicht, dass hier entsprechende Berechnungen von Rand- und Anfangswertproblemen und auch das Messen von physikalischen Größen wie Drücken mehr Probleme aufwerfen als bei einer Einphasenströmung.

Entsprechend kompliziert und vielfältig sind die konstitutiven Beziehungen für die Spannungstensoren und damit auch die Drücke der Fluide. Mit dem Ziel, die konstitutiven Beziehungen so komplex wie nötig und so einfach wie möglich zu gestalten, haben sich

folgende Gleichungen für die Spannungstensoren von Luft (Index G) und Wasser (Index F) ergeben (Perau, 2001b):

$$\underline{\mathbf{T}}_G = -p_G(n, S, \rho_{GR}) \cdot \underline{\mathbf{I}} \quad \text{mit} \quad p_G = \rho_{GR} \cdot n \cdot (1 - S) \cdot RT \quad (4a)$$

$$\underline{\mathbf{T}}_F = -p_F(n, S, \rho_{GR}) \cdot \underline{\mathbf{I}} \quad \text{mit} \quad p_F = \rho_{GR} \cdot n \cdot S \cdot RT - n \cdot S \cdot F_{CF}(S, n) \quad (4b)$$

Darin sind  $n$  und  $S$  Porenanteil und Sättigungsgrad wie sie in der Bodenmechanik wohlbekannt sind.  $F_{CF}$  ist eine Funktion, die die kapillaren Eigenschaften des jeweiligen Bodens beschreibt. Ihr Wert kann dabei als "Kapillarkraft" gedeutet werden. Kapillarität ist demnach aus makroskopischer Sicht eine Art Diffusion; sie bewirkt hier ein Angleichen der Konzentrationen der Fluide Wasser und Luft im Boden (Perau, 2001b). Die Konzentrationen werden nur deshalb nicht vollkommen ausgeglichen, weil andere Kräfte, wie zum Beispiel die Gravitationskraft, ihr mitunter entgegenwirken.

Für die entsprechenden Gleichungen wurde ein Programm auf Basis der Finite-Element-Methode geschrieben, mit dem numerisch Experimente zur Zweiphasenströmung in einem starren Korngefüge nachvollzogen werden können (Potthoff/Perau, 2002).

Aus weiteren Überlegungen, die in (Perau, 2001a) detailliert besprochen werden, ergibt sich aus (4) für die "realen" Fluiddrücke der Luft  $p_{GR}$  und des Wassers  $p_{FR}$ :

$$p_{GR} = \rho_{GR} \cdot RT \quad (5a)$$

$$p_{FR} = \rho_{GR} \cdot RT - F_{CF}(S, n) \quad (5b)$$

Die Gradienten dieser Drücke sind dann, multipliziert mit den jeweiligen Volumenanteilen der Fluide, Summanden in der jeweiligen Bewegungsgleichung. Die Drücke  $p_{GR}$  und  $p_{FR}$  stehen deshalb gewissermaßen "konkurrenzlos" da. Diese sind deshalb *die Drücke* der beiden Fluide. Der Luftdruck hängt, wie bereits in (2) formuliert, von Temperatur und Dichte der Luft ab. Der Wasserdruck hängt ebenfalls von diesen Größen, jedoch noch zusätzlich von der noch näher zu bestimmenden Funktion  $F_{CF}$  von Sättigungsgrad und Porenanteil ab. Aus (5) ergibt sich auch direkt der Zusammenhang zwischen den beiden Drücken:

$$p_{FR} = p_{GR} - F_{CF}(S, n) \quad (6)$$

Man erkennt hier die grundsätzliche Sinnhaftigkeit der klassischen Saugspannungs-Sättigungsbeziehung (vgl. z.B. van Genuchten, 1980). Diese Beziehung lässt sich also

rational begründen. Die Rationalität der heute zumeist benutzten Saugspannungs-Sättigungsbeziehung in der Formulierung von Mualem/van Genuchten (van Genuchten, 1980) muss trotzdem angezweifelt bleiben (Perau/Richwien, 1998).

So wie die mathematische Beschreibung der *Zwei*phasenströmung im Boden im Vergleich zur *Ein*phasenströmung außerordentlich schwierig ist, ist auch das Messen von Fluiddrücken in einem porösen Medium mit *zwei* fluiden Phasen ein vergleichsweise schwieriges Problem.

Zweifellos erscheint es notwendig, wie bei der Einphasenströmung eine Kammer zu haben, die die druckaufnehmende Membran vor den mechanischen Einwirkungen aus dem Korngefüge schützt; andernfalls ließe sich die Membranbeanspruchung auch hier nicht in Anteile aus Korngefüge und Fluide unterteilen.

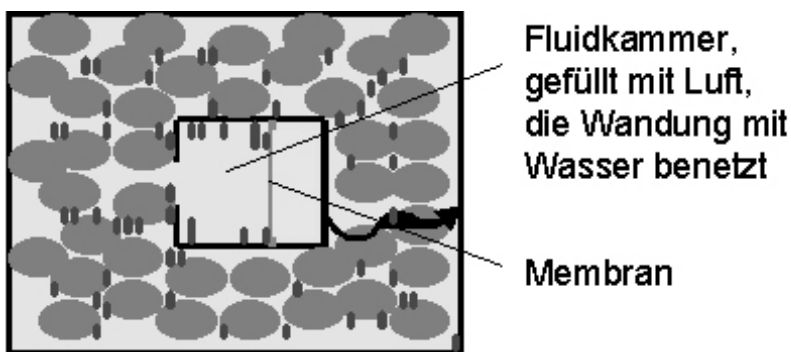


Abb. 3 Messprinzip "Druck zweier Fluide im porösen Medium"

Will man jedoch die Drücke innerhalb der Kammer unter realistischen Bedingungen, das heißt wie im Kapillarsystem der Bodenporen, messen, muss auch das Innere der Kammer ein entsprechendes Kapillarsystem besitzen. Die Kammer muss darüber hinaus genau wie der umgebende Boden, in dem gemessen werden soll, in gleicher Weise mit Luft und Wasser gefüllt sein. Beide Kriterien dürften äußerst schwer bis gar nicht zu realisieren sein!

Es ergeben sich weitere Fragen: Wie würden sich die Fluide an der Membran verteilen? Welcher Druck würde gemessen? Denkbar wäre es, den Luftdruck zu messen – aber nur wenn nicht zu viel Wasser vorhanden ist, das in die Kammer eindringt. Auch umgekehrt wäre es denkbar, so den Wasserdruck zu messen – wenn nicht zu viel Luft da ist. Solche Art Messungen gehören jedoch zu einem mechanischen Modell "Einphasenströmung", bei

dem die fluide Phase zum Beispiel aus Wasser mit darin gelöster Luft besteht (vgl. z.B. Köhler 1996). Unter solchen Annahmen ergeben sie einen Sinn.

Normalerweise wird ein Fluiddruck in einem mit Wasser und Luft gefüllten Boden mit Tensiometern gemessen. Auch beim Tensiometer wird der Druckaufnehmer durch eine Kammer vor den Kräfteinwirkungen des Korngefüges geschützt. Die Kammer ist zum umgebenden Boden hin durch eine durchlässige aber feinporige Keramikwandung, der Tensiometerkerze begrenzt und vollständig mit entgastem Wasser gefüllt. Da das Wasser inkompressibel ist, kann es den Druck von der Umgebung der Kerze an den Druckaufnehmer im Tensiometerkorpus weitergeben (Perau, 2001a).

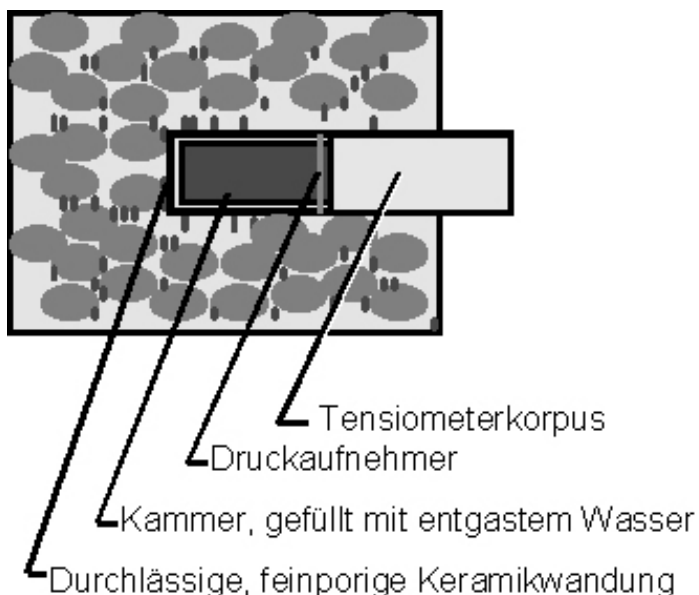


Abb. 4 Prinzip des Messen eines Fluiddrucks durch ein Tensiometer

Die Frage letztlich verbleibt, *welcher* Druck es ist, der aus dem Boden über das Wasser an den Druckgeber weitergeleitet wird. Um diese Frage zu beantworten, sollten wir zunächst zwei Extremfälle der Zweiphasenströmung betrachten: die Einphasenströmungen von Wasser bzw. die Einphasenströmung der Luft.

Befindet sich nur Wasser, aber definitiv keine Luft im Boden, sollten die Tensiometer genau so funktionieren wie die oben beschriebenen Druckaufnehmer für Einphasenströmungen (vgl. Abb. 2). Gemessen wird also der Porenwasserdruck als Differenzdruck zu einem feststehenden konstanten Druck, z.B. dem atmosphärischen Druck.

Im anderen Extremfall, es befindet sich in einem nichtbindigen Boden *nur Luft aber definitiv kein Wasser*, wird das Wasser aus der Tensiometerkerze herausgesogen. Das Tensiometer wird also zurecht eine sehr große Saugspannung anzeigen. Unglücklicherweise ist diese Saugspannung aber ein Effekt, der nur bei einer Mehrphasenströmung auftaucht, sie besitzt bei der Einphasenströmung von Luft gar keine Bedeutung. Im mechanischen Modell zur Einphasenströmung taucht eine derartige Saugspannung überhaupt nicht auf.

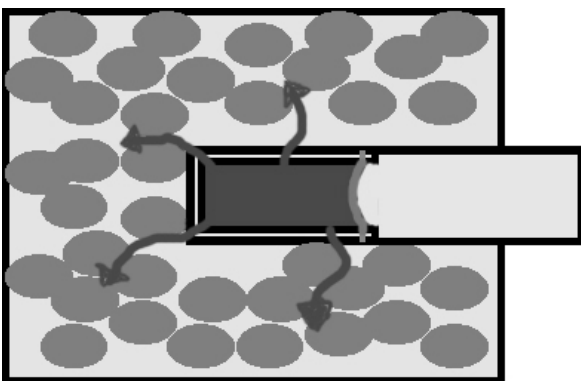


Abb. 5 Tensiometer im Extremfall "kein Wasser im Boden"

In dem vorliegenden Extremfall liefert die Messung des Drucks also einen Wert, die "Saugspannung", welche für das mechanische Modell absolut überflüssig ist und an keiner Stelle eingeordnet werden kann. Der gemessene Wert ist einzig und allein eine *Auswirkung des Messverfahrens selber*. Er beschreibt zwar eine Eigenschaft des Bodens, die man mit "Saugfähigkeit" umschreiben könnte, gibt jedoch hier *nichts* vom aktuellen Zustand des Bodens und seinem Fluid wieder.

Damit muß die Sinnhaftigkeit dieses Messverfahrens, wenn auch nicht die Praktikabilität – zumindest für diesen Grenzfall und benachbarte Zustände – stark in Zweifel gezogen werden. Große gemessene Saugspannungen müssen mit entsprechend großer Skepsis betrachtet werden. Das gleiche gilt bekanntlich auch für die Saugspannungs-Sättigungsbeziehungen in der Art, wie sie z.B. van Genuchten (1980) vorgeschlagen werden, hier wachsen die Spannungen sogar ins Unendliche!

Nun sind Tensiometer sicherlich nicht für vollständig wasserleere Böden gedacht, sondern in erster Linie für teilgesättigte Böden im praktisch relevanten Sättigungsbereich. Im

Standardfällen wirkt die oben angeführte Problematik also nicht virulent. Es bleibt jedoch zu prüfen, ob Berechnungen vollständig im zulässigen Definitionsbereich der Sättigungen stattfinden. Gehen wir im weiteren davon aus, dass wir unsere Messungen auf entsprechend zulässige Bereiche beschränken.

In den technischen Beschreibungen zu Tensiometern wird diesen Geräten die Messung der "Saugspannung des Bodens" zugeschrieben. Man geht also offenbar davon aus, dass der Luftdruck im Boden, dem Luftdruck außerhalb des Bodens, also dem atmosphärischen Druck entspricht. Nur dann kann der an der Membran gemessene Druck als die "Saugspannung" verstanden werden.

Bei geotechnischen Projekten mit Druckluft ist das sicherlich nicht der Fall; hier muß davon ausgegangen werden, dass die Luftdrücke im Boden entsprechend höher sind. Es wird dann offensichtlich nicht die Saugspannung gemessen. Der Messwert als solcher enthält dann Anteile aus Luftdruck und Saugspannung und lässt sich nicht problemlos aufspalten.

Inwieweit zum Beispiel bei einfachen Versickerungs- oder Bewässerungsproblemen tatsächlich der Luftdruck dem atmosphärischen Luftdruck gleich ist, lässt sich an dieser Stelle nicht abschließend beurteilen. Es muß aber befürchtet werden, dass atmosphärische Drücke für die Luft im Boden durch Kurzschlüsse, die mit derartigen Messungen verbunden sein können, überhaupt erst erzeugt werden (Perau, 2001a).

Eine weitere, nicht zu unterschätzende Schwierigkeit der Interpretation von Tensiometermessungen besteht in der Störung, die der Einbau und die bloße Existenz der Tensiometer für den Boden darstellt. Vor allem bei aggregierten Böden ist die Frage, ob die Längenskala, auf der die Messung stattfindet, geeignet ist. Ergebnisse sind mit Vorsicht zu betrachten.

Wie auch immer, es lässt sich aus einer Tensiometermessung ein Druck gewinnen, der offenbar eine Summe von Luftdruck und Saugspannung darstellt. Der Messwert ist mit vielen Unzulänglichkeiten und Unsicherheiten behaftet, die den Wunsch nach alternativen Messverfahren erwecken.

Es bleiben große Zweifel, ob die Drücke, die wir mit Tensiometern messen, die Drücke sind, deren Gradienten in den Bewegungsgleichungen stehen oder nicht doch nur so

etwas wie Indikatoren für diese Drücke. Das würde auch erklären, warum es zu solch entarteten Kurven für die Saugspannungs-Sättigungsbeziehung wie die von Mualem/van Genuchten (van Genuchten, 1980) kommen kann.

## 8 Schlussfolgerung

Dieser Beitrag zeigt, dass das Messen von Fluiddrücken in Böden bei *einer* fluiden Phase wie Wasser *oder* Luft recht einfach und plausibel ist, bei Böden mit *zwei* fluiden Phasen, den sogenannten "teilgesättigten Böden" jedoch äußerst kompliziert und problematisch. Auch bei seit vielen Jahren praktizierten Messverfahren, wie der Tensiometermessung, bleiben noch viele Fragen offen.

Vor allen Dingen aber dürfen Messungen *nicht* losgelöst von mechanischen Modellen vorgenommen und ausgewertet werden. Auf keinen Fall dürfen Messreihen vorschnell und unreflektiert zu "Theorien" erhoben werden.

## 9 Literatur

- Bachmann, M. (1998): Die Messung der Porenwasserspannung bei Tonböden im Ödometer-Versuchsstand, Fachseminar Messen in der Geotechnik '98, Mitteilung des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik, Technische Universität Braunschweig, Heft 55, S. 273-286
- Bear, J. (1972) Dynamics of Fluids in Porous Media. New York
- Dahte, A., Diekkrüger, B. (1996): Messung des Bodenwassergehaltes mit TDR-Sonden, Fachseminar Messen in der Geotechnik '96, Mitteilung des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik, Technische Universität Braunschweig, Heft 50, S. 185-200
- Fischer, C. M. (1998): Automatisierung weiträumig verteilter Porenwasserdruck- und Wasserstandsmessungen, Fachseminar Messen in der Geotechnik '98, Mitteilung des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik, Technische Universität Braunschweig, Heft 55, S. 273-286
- van Genuchten, M. Th. (1980): A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Science Society of America. Journal 44, S. 892-898
- Gülzow, H.-G. (1994): Dreidimensionale Berechnung der Zweiphasenströmung beim Tunnelvortrieb unter Druckluft in wassergesättigten Böden, Veröffentlichungen des Instituts für Grundbau, Bodenmechanik, Felsmechanik und Verkehrswasserbau der RWTH Aachen, Heft 25
- Köhler, H. J. (1996): Porenwasserdruckausbreitung im Boden, Meßverfahren und Berechnungsansätze, Fachseminar Messen in der Geotechnik '96, Mitteilung des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik, Technische Universität Braunschweig, Heft 50, S. 247-258d

- Kramer, J., Semprich, St. (1989): Erfahrungen über Druckluftverbrauch bei der Spritzbetonbauweise, Taschenbuch für den Tunnelbau, 1989, S. 91-153
- Perau, E. (2001a): Messung von Drücken - Theorie und Experiment, Tagungsband zum Zweiten Workshop "Teilgesättigte Böden", Weimar 2000, Bauhaus-Universität Weimar, Schriftenreihe Geotechnik, Heft 04, S. 25-33
- Perau, E. (2001b): Die Phasen des Bodens und ihre mechanischen Wechselwirkungen - Ein Konzept zur Mechanik teilgesättigter Böden, Mitteilungen aus dem Fachgebiet Grundbau und Bodenmechanik, Heft 28, Hrsg.: Prof. Dr.-Ing. W. Richwien, Essen
- Perau, E., Richwien, W. (1998): Constitutive equations on movement of water and air in soils on basis of theory of porous media. 2<sup>nd</sup> International Conference of Unsaturated Soils, UNSAT '98 in Beijing, P.R. China. Vol. I, S. 590-595
- Potthoff, S., Perau, E. (2002): Numerische Lösung zur Zweiphasenströmung mit Hilfe der Gemischten Finite-Element-Methode, Tagungsband zum Dritten Workshop "Teilgesättigte Böden", Weimar 2001, Bauhaus-Universität Weimar, Schriftenreihe Geotechnik, (im Druck)
- Tamáskovics, N. (2001): Beitrag zur Klärung der Mechanismen von Verdichtungssprengungen, Veröffentlichungen des Instituts für Geotechnik der Technischen Universität Bergakademie Freiberg, Heft 2001-3

---

Anschriften des Autors und der Autorin:

PD Dr.-Ing. Eugen Perau

Dipl.-Ing. Susanne Potthoff

Universität Essen, Fachbereich Bauwesen

Institut für Grundbau und Bodenmechanik

45117 Essen

Tel. 0201-183-2853/59,

<http://www.uni-essen.de/grundbau>

email: [eugen.perau@uni-essen.de](mailto:eugen.perau@uni-essen.de), [susanne.potthoff@uni-essen.de](mailto:susanne.potthoff@uni-essen.de)