

Poröse Materialien spielen eine wichtige Rolle in vielen Bereichen des Ingenieurwesens sowie der Biomechanik, nämlich in der Bodenmechanik, den Materialwissenschaften, der Erdölindustrie, der Verfahrenstechnik und der Umwelttechnik sowie in der Medizin und Botanik. In den letzten Jahrzehnten ist für die thermomechanische Beanspruchung solcher mit Flüssigkeit und/oder Gas gefüllten Stoffe eine einheitliche Theorie entwickelt worden, die die numerische Simulation von Rand- und Anfangswertproblemen erlaubt.

Eine Theorie fürs Grobe und Feine

Die Theorie poröser Medien (Materialien)

Von Reint de Boer und Joachim Bluhm

Theorien sind wesentliche Bestandteile der Natur- und Ingenieurwissenschaften. Theorie, aus dem Griechischen abgeleitet, bedeutet im heutigen Sinne durch Denken gewonnene Erkenntnisse, eine Erklärung von Zusammenhängen und Tatsachen auf der Basis von Axiomen, die aus der Erfahrung gewonnen worden und nicht ableitbar sind. Speziell im konstruktiven Ingenieurbau spielen kontinuumsmechanische Theorien eine eminente Rolle – insbesondere im Maschinenbau und Bauwesen. Dem Begriff Theorie haftet allerdings in vielen

Fällen etwas Negatives an. Man erinnere sich in diesem Zusammenhang an den Ausspruch des Mephistopheles in Goethes Faust:

*„Grau, teurer Freund, ist alle Theorie,
Und grün des Lebens goldner Baum.“*

Besser kann man wohl das Unbehagen gegen das Denkgebäude Theorie, das für viele wegen der oft komplexen Strukturen unverständlich wirkt, nicht ausdrücken. Dieses Unbehagen hat sich insbesondere in neuer Zeit zu einem ausgewachsenen Vorurteil und darüber hinaus zum

Programm ausgeweitet. Hören wir nicht öfter: Das verstehe ich nicht, das ist mir zu theoretisch. Oder es kommt die Forderung, die Ausbildung der Studenten an wissenschaftlichen Hochschulen praxisbezogener zu gestalten. Praxis hat nichts mit Wissenschaft zu tun; allenfalls kann sie dazu dienen, Erfahrungswerte zu sammeln, an denen theoretische Überlegungen auszurichten sind. Welcher Ingenieur soll in Zukunft Probleme lösen, die eine konsistente theoretische Basis erfordern, so wie der Bau von schlanken Türmen, von gewagten



Joachim Bluhm. Foto: Max Greve

Schalenkonstruktionen oder von komplizierten Gründungen? Wer soll in der Entwicklung von neuen Fahrzeugen tätig werden, wenn er keine Kenntnisse in der Dynamik hat? Ganz zu schweigen von dem wissenschaftlichen Nachwuchs, der neu auftretende Ingenieurprobleme wissenschaftlich durchdringen soll und gegebenenfalls neue Theorien aufstellen muss. Und auch im Faust ist es nicht ein Fachmann, dem Goethe den vorhin zitierten Ausspruch in den Mund legte – sondern Mephistopheles in einer Diskussion mit einem Schüler, nachdem er für sich festgestellt hatte:



(1) Grobe Schäden an einer Binnenböschung (Christianskoog).
Quelle: ALW-Husum

„Ich bin des trockenen Tons nun satt,
Muss wieder recht den Teufel
spielen.“

Dass kontinuumsmechanische Theorien wichtig sind, wurde bereits in den Anfängen der Entwicklung der modernen Naturwissenschaften erkannt. Es war der Mathematiker, Physiker und Philosoph Leonhard Euler, der im 18. Jahrhundert der Kontinuumsmechanik mit der Schaffung der Theorie starrer Körper und der Hydromechanik idealer Flüssigkeiten den Weg bereite. Aufbauend auf den grundlegenden Überlegungen Eulers wurde dann im folgenden Jahrhundert die lineare Elastizitätstheorie entwickelt, die die Grundlage

für die Baustatik mit der Stabtheorie, der Theorie der Flächentragwerke und der Schwingungslehre bildet. Im letzten Jahrhundert wurde die lineare Elastizitätstheorie ergänzt durch Überlegungen zu endlichen Deformationen, um die Plastizitäts-, Viskoelastizitäts- und Viskoplastizitätstheorie.

Die lineare Elastizitätstheorie beschreibt das elastische (reversible) Verhalten der Körper oder Strukturen unter Belastungen bei kleinen Formänderungen, während die Plastizitätstheorie bei plastischen (irreversiblen) Deformationen zur Anwendung kommt, das heißt bei

solchen Prozessen, bei denen nach Entlastung bleibende Formänderungen anstehen. Schließlich berücksichtigen die Viskoelastizitätstheorie und die Viskoplastizitätstheorie zeitliche Effekte in den Formänderungen und im Verlauf der inneren Kräfte.

Die genannten Theorien befassen sich mit dem mechanischen und thermischen Verhalten der Festkörper. Aber auch die Beschreibung des thermomechanischen Verhaltens der Flüssigkeiten und Gase sind im 19. Jahrhundert weiter entwickelt worden mit der Einbeziehung von zähen Flüssigkeiten, kompressiblen (zusammendrückbaren) Gasen und

Mischungen aus Flüssigkeiten und Gasen.

Mit diesen Theorien stehen dem Ingenieur „Werkzeuge“ zur Verfügung, mit denen er das thermomechanische Verhalten der Festkörper und Strukturen, Flüssigkeiten und Gase mit unterschiedlichen Materialeigenschaften bei Belastungen voraussagen kann. Man mag in diesem Zusammenhang die Frage stellen, warum der Ingenieur solche, zum Teil sehr komplexe Theorien lernen muss, wenn vielleicht auch Experimente mit Modellen, die für die Dimensionierung von Tragsystemen oder für die Beschreibung der Bewegungszustände der festen, flüssigen und gasförmigen Körper erforderlichen Daten liefern können. Hierauf ist zu antworten, dass experimentelle Untersuchungen meist auf einfache, spezielle Modelle beschränkt werden müssen, die nur Näherungsergebnisse für bestimmte Lastfälle liefern können; denn 1:1-Modelle scheitern vielfach allein daran, dass diese zum einen zu teuer sind und zum anderen, dass sie, beispielsweise bei Bauwerken wegen ihrer Größe, nicht machbar sind. Somit bleibt als Erkenntnis, dass Theorien, die das thermomechanische Verhalten von Körpern unter Belastung voraussagen können, von elementarer Bedeutung sind. Dies bedeutet nun nicht, dass ein Bauingenieur bei der Dimensionierung von Bauwerken die lineare Elastizitätstheorie in allen Belangen beherrschen muss. Es sind nämlich im Laufe der Zeit aus der allgemeinen linearen Elastizitätstheorie sowohl die Stabtheorie als auch die Theorie der Flächentragwerke (Schalen und Platten) abgeleitet worden. Der Ingenieur kann sich in vielen Fällen dieser Spezialtheorien, die außerdem gesonderte Rechenverfahren hervorgebracht haben, bedienen, um den im Material zu erwartenden Formänderungszustand und Zustand der inneren Kräfte zu ermitteln. Dies kann heutzutage für beliebige Formen der Strukturen unter den unterschiedlichsten Belastungen durchgeführt werden, da numeri-

sche Berechnungsmethoden auf der Basis von Computerprogrammen vorliegen, die bei erträglichem Zeitaufwand alle geforderten Größen liefern. Die lineare Elastizitätstheorie dient im Allgemeinen vielmehr dazu, die Gültigkeitsgrenzen bestehender Sondertheorien und Berechnungsverfahren festzulegen; sie fungiert sozusagen als „Überbau“ für die Spezialtheorien und Verfahren.

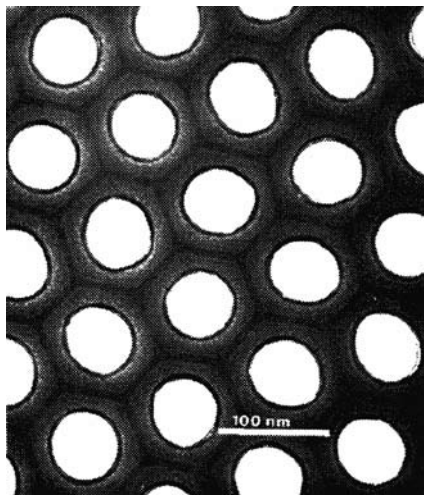
Ähnliche Überlegungen gelten auch für Plastizitäts-, Viskoelastizitäts- und Viskoplastizitätstheorien sowie für die Theorien von Flüssigkeiten und Gasen.

Kennzeichnend für die angesprochenen Theorien ist, dass die zugrunde gelegten Materialien kontinuierlich in Kontrollräumen verteilt sind, also Kontinua bilden. Die Mechanik solcher Kontinua (Kontinuumsmechanik) ist heute zu einem gewissen Abschluss gebracht worden. Nun muss man allerdings feststellen, dass in vielen Materialien leere Hohlräume existieren, die man Poren nennt und die geschlossen oder miteinander verbunden, also offen sind. In vielen Körpern wie in Schwämmen, Sandkörpern und Geröllmassen, sind diese mit bloßem Auge zu erkennen (Abb. 1), während sie in anderen erst unter dem Mikroskop sichtbar werden. So zeigt die menschliche Haut unter dem Mikroskop mehrere hundert Poren pro Quadratzentimeter, und auf der Nano-Ebene enthüllt das Elektronenmikroskop bei Körpern wie Aluminium-Membranen (Abb. 2) und Beton Milliarden von feinen Poren in diesem Gebiet. Die Porengröße schwankt dabei zwischen einigen Zentimetern und wenigen Nanometern ($1 \text{ nm} = 10^{-6} \text{ mm}$).

Poröse Körper sind nicht allein von akademischem Interesse. Sie spielen vielmehr eine wichtige Rolle in der Praxis. Poröse Körper, leer oder gefüllt mit Flüssigkeit und/oder Gas, kann man in vielen Zweigen des Ingenieurwesens und der Biomechanik finden, nämlich sowohl in den Materialwissenschaften, der Erdölindustrie, Verfahrenstechnik,

Bauphysik, Umwelttechnik und Bodenmechanik als auch in der Medizin und der Botanik (Wachstum von Pflanzen). In diesen Gebieten müssen die verschiedenen Reaktionen auf thermomechanische und mechanische Beanspruchungen der einzelnen Konstituierenden (poröser Körper, Flüssigkeit, Gas) und ihre gegenseitigen Interaktionen studiert und präzise beschrieben werden, um die Antwort der Systeme auf Belastungen voraussagen zu können.

In der Vergangenheit sind diese heterogen aufgebauten Materialien im Allgemeinen als Einkomponentenkontinua mit den Methoden der

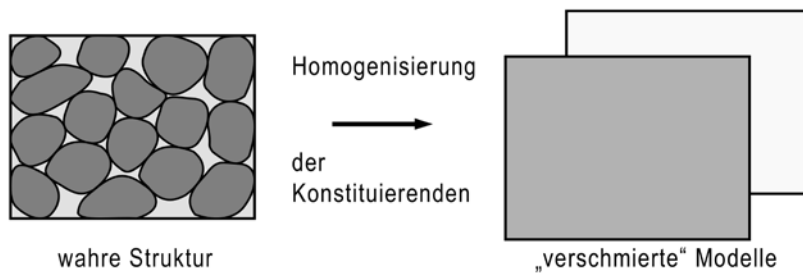


(2) Filter aus Aluminiumoxyd mit feinen Poren im Nanobereich.

Quelle: Schmid, Günter: Materials in nanoporous alumina, Journal of Materials Chemistry 12/2002, 1231–1238

klassischen Kontinuumsmechanik behandelt worden. Diese können natürlich keine Fragen beantworten, die die Änderung der Poren und die Bewegung der verschiedenen Konstituierenden betreffen. Auch Interaktionswirkungen zwischen den Konstituierenden, wie etwa den Kapillarkräften, können durch klassische kontinuumsmechanische Verfahren nicht berechnet werden. Aus diesen Gründen muss man die klassische Vorgehensweise zur Berechnung des Formänderungszustandes und des Zustandes der inneren Kräfte in einem leeren oder saturierten porösen Festkörper verlassen und nach neuen Wegen

suchen. Materialien mit leeren Poren, wie trockener Beton, sind einer thermomechanischen Behandlung noch am leichtesten zugänglich, weil alle Bestandteile in einem materiellen Punkt dieselbe Bewegung besitzen, wenn der Betonkörper verformt wird. Die Verhältnisse liegen jedoch ganz anders bei gesättigten oder teilgesättigten porösen Stoffen. Wegen der unterschiedlichen Bewegungen der Konstituierenden und der verschiedenen Materialeigenschaften beeinflussen sich die einzelnen Materialien gegenseitig und es treten Interaktionen auf, die die Beschreibung des thermomechanischen Verhaltens des gefüllten porösen Körpers so schwierig gestalten. Mehr noch, durch den im Allgemeinen komplizierten geometrischen Aufbau der inneren Porenstruktur werden die Probleme bei der Untersuchung solcher poröser Körper äußerst komplex. Auf den ersten Blick scheint es möglich zu sein, zwei Strategien bei der Behandlung des komplizierten Problems der Ermittlung des Formänderungszustandes und des Zustandes der inneren Kräfte zu verfolgen. Als erste Strategie kann die exakte Lösung des Problems angesehen werden. Dazu wäre es erforderlich, die einzelnen Konstituierenden zu separieren. Danach müssten die Axiome der Mechanik und Thermodynamik auf die separierten Konstituierenden angewendet werden, wobei alle Randbedingungen der einzelnen Phasen und ihre Anfangsbedingungen berücksichtigt werden müssten. Eine solche Methode mag in Sonderfällen zum Erfolg führen. Für die Entwicklung einer allgemeinen Theorie von leeren und saturierten porösen Medien ist dieses Vorgehen allerdings vollständig unbrauchbar wegen der unbekannt inneren geometrischen Porenstruktur der Festkörper. Darüber hinaus ist ein solches Vorgehen für Ingenieurprobleme und biomechanische Fragestellungen in vielen Fällen überhaupt nicht erforderlich, weil die Probleme eine exakte Beschrei-



(3) Homogenisierung des porösen Mediums.

bung der wirklichen physikalischen Phänomene oft gar nicht benötigen. Ein Beispiel: Um die Auswirkungen von Grundwasserströmungen in Böden zu untersuchen, ist der planende Ingenieur überhaupt nicht an der wirklichen Geschwindigkeit des Wassers in den einzelnen Poren des porösen Bodens interessiert; für seinen Entwurf benötigt er nur die Sickergeschwindigkeit, das heißt die Durchschnittsgeschwindigkeit der Wasserströmung in allen Poren. Es hängt somit vom Problem ab, ob Untersuchungen erforderlich sind über Erscheinungen in den wirklichen Konstituierenden (Mikrobereich) oder in dem Bereich, in dem alle definierten und gemessenen Werte des wirklichen Bereichs als statistische Durchschnittswerte angesiedelt sind (Makrobereich).

Es ist also eine zweite Strategie erforderlich, die in der makroskopischen Beschreibung des Problems besteht. Mit einer solchen Vorgehensweise löst man nicht das exakte Problem, sondern schafft ein mathematisches Modell, das aus heterogen aufgebauten Kontinua mit inneren Interaktionen besteht.

Die zugehörige wissenschaftliche Durchdringung der makroskopischen Beschreibung des thermomechanischen Verhaltens der leeren und gefüllten porösen Materialien (Medien) in den letzten Dekaden haben zu einer geschlossenen und konsistenten Theorie geführt, die eine Kombination von Festkörpermechanik und Hydrodynamik darstellt unter Berücksichtigung aller Interaktionen zwischen den Konstituierenden¹. Da die Festkör-

permechanik und Hydrodynamik kontinuumsmechanische Theorien sind, ist es notwendig, eine Homogenisierung des porösen Materials durchzuführen.

Das Konzept der Volumenanteile

Die Homogenisierung erfolgt mit Hilfe des Konzepts der Volumenanteile, das die Massen sowohl des Festkörperskeletts als auch der Flüssigkeit und/oder des Gases über den Kontrollraum verteilt, der durch den porösen Festkörper gebildet wird. Die Verteilung gelingt mit Hilfe von Porositätszahlen, die die Anteile der wirklichen Volumenelemente der Konstituierenden im Verhältnis zu den Volumenelementen des Kontrollraumes festlegen. Das Konzept der Volumenanteile setzt voraus, dass die Poren statistisch über den Kontrollraum verteilt sind. Es hat den Vorteil, dass die Porosität physikalisch zugänglich und messbar ist, im Gegensatz zu manch anderen Durchschnittsbildungskonzepten. Weiterhin machen sie die Identifizierung der einzelnen Konstituierenden in jeder Phase der Formänderungsprozesse und der Bewegungszustände möglich (Abb. 3). Das Konzept kann natürlich keine Angaben über die Porenstruktur und die exakte Lage der individuellen Komponenten des gefüllten porösen Körpers machen. Es liefert jedoch wohldefinierte homogenisierte („verschmierte“) Kontinua mit reduzierten Dichten und mit Interaktionswirkungen zwischen den einzelnen Komponenten; diese Kontinua (Partialkörper) sind

einer kontinuumsmechanischen Behandlung zugänglich.

Die Mischungstheorie und die Theorie poröser Materialien

Es ist offensichtlich, dass die mit Hilfe des Konzepts der Volumenanteile geschaffenen Kontinua-Modelle, die in einem Kontrollraum nebeneinander existieren, ähnliche Eigenschaften aufweisen wie Mischungen von Flüssigkeiten und/oder Gasen mit dem Unterschied, dass die einzelnen homogenisierten Kontinua identifizierbar sind. Die Theorie der Mischungen ist in den letzten Dekaden zu einem gewissen Abschluss gebracht worden. Somit steht mit der Kontinuumstheorie der Mischungen, die verschiedene Konstituierende mit eigenen Freiheitsgraden enthalten, eine gesicherte Theorie zur Verfügung. Es war daher ganz augenscheinlich, das Konzept der Volumenanteile mit der Mischungstheorie zu verknüpfen (Theorie poröser Medien, TPM), um das komplexe mechanische und thermomechanische Verhalten von saturierten porösen Körpern oder Strukturen mathematisch beschreiben zu können. Es muss jedoch daran erinnert werden, dass im Prinzip einige Hauptannahmen der Mischungstheorie, nämlich die vollständige Vermengung aller Substanzen im Kontrollraum, für das wirkliche saturierte Festkörperskelett nicht zutreffen, da der poröse Festkörper und die Flüssigkeit und/oder Gas in Wirklichkeit nicht vermischt werden können. Aber die Theorie der porösen Medien kreiert ein mathematisches Modell, das die Beschreibung des thermomechanischen Verhaltens von leeren und saturierten porösen Medien unter Last und Wärme unter Berücksichtigung mikromechanischer Effekte wie InkompRESSIBILITÄT (Unzusammendrückbarkeit) und Kompressibilität des wirklichen Materials, Einfluss des Porenwasserdrucks auf die Festkörperphase sowie Kapillarität ermöglicht. Das mathematische Modell (TPM), basie-

rend auf dem Konzept der Volumenanteile und der Mischungstheorie, stellt den am weitesten entwickelten Rahmen für die Behandlung von gefüllten porösen Körpern zur Verfügung. Andere Konzepte für die Untersuchung solcher Körper sind oft auf obskuren Annahmen gegründet und mathematische Modelle sind nur ganz selten entwickelt worden, so dass konkrete Problemstellungen nicht bearbeitet werden können.

Grundgleichungen

Die Grundgleichungen der Theorie poröser Medien können der Mischungstheorie entnommen werden, müssen aber von Fall zu Fall den Besonderheiten des Konzepts der Volumenanteile angeglichen werden. Zu den Grundgleichungen gehören die Kinematik der Deformationen, die Bilanzgleichungen und die konstitutiven Beziehungen. Die Kinematik der materiellen Punkte in der Mischungstheorie besteht aus der Bewegung dieser Punkte und den daraus abgeleiteten Größen, wie Geschwindigkeit und Beschleunigung. Sie basiert auf zwei grundlegenden Annahmen:

1. Jeder räumliche Punkt ist gleichzeitig besetzt durch materielle Punkte aller Konstituierenden.
2. Jede Konstituierende besitzt einen unabhängigen Bewegungszustand (Abb. 4).

Die erste Annahme ist als Näherung zu verstehen. Wegen der Undurchdringlichkeit der materiellen Punkte kann in Wirklichkeit nur ein materieller Punkt den räumlichen Punkt besetzen. In der Mischungstheorie wird vorausgesetzt, dass die materiellen Punkte aller Konstituierenden in der Nähe des betrachteten räumlichen Punktes liegen, so dass die Abstände zu diesem Punkt sehr klein sind und somit in der Rechnung vernachlässigt werden können. Die zweite Annahme über die Unabhängigkeit der Bewegung gilt in der Theorie der Deformationen ebenfalls nur mit Einschränkungen. Bei saturierten porösen Festkörpern übt die Bedingung zur Aufrechterhaltung der Saturiertheit einen Zwang auf die Deformationen aller Konstituierenden aus und schränkt somit die Unabhängigkeit der Bewegung der einzelnen Phasen ein.

Während die Kinematik nur die Bewegungen der materiellen Punkte und keine physikalischen Gesetze beschreibt, beinhalten die Bilanzgleichungen fundamentale Axiome der Mechanik und Thermodynamik. In der Mischungstheorie und Theorie poröser Medien müssen Bilanzgleichungen, das heißt Massenbilanz, Bilanz der Bewegungsgrößen (Bewegungsgröße kennzeichnet das Produkt aus Masse und Geschwindigkeit) und der Momente der Bewegungsgrößen sowie Bilanz der

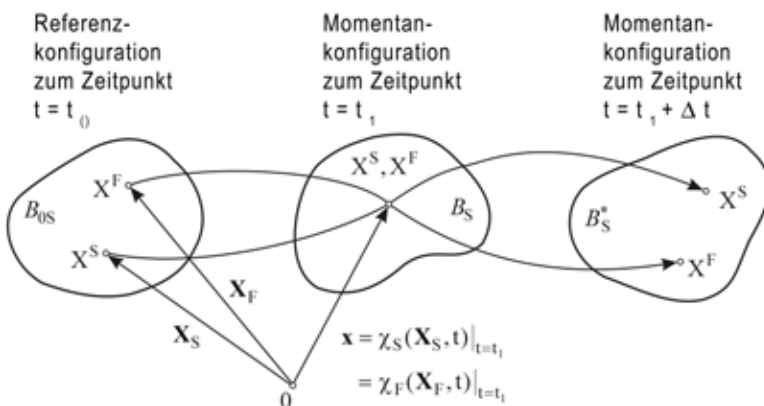
Energie, für jede einzelne Konstituierende formuliert werden unter Beachtung aller Interaktionen zwischen den einzelnen Phasen und den äußeren Einwirkungen.

Die *Massenbilanz* fordert für die individuelle partielle Konstituierende, dass der zeitliche Zuwachs ihrer Masse gleich ist dem Massenzuwachs, der durch die anderen Konstituierenden verursacht wird (beispielsweise Eis für die Festkörperphase, das von der Flüssigkeitsphase stammt).

Die *Bilanz der Bewegungsgröße* beschreibt, dass die zeitliche Ableitung der Bewegungsgröße einer einzelnen Konstituierenden gleich ist der Summe aller angreifenden Kräfte, wobei natürlich auch die Summe der Interaktionskräfte berücksichtigt werden muss. Dieses Axiom, von Isaac Newton formuliert, ist bei konstanter Masse besser bekannt als Kraft gleich Masse mal Beschleunigung, obwohl es von Newton in dieser Weise nicht dargestellt wurde – erst recht nicht in Formeln. Während Newtons Axiom von fundamentaler Bedeutung in der Physik ist, hat die Bilanz des Momentes der Bewegungsgröße eine geringe Relevanz.

Schließlich wenden wir uns noch der Bilanz der Energie zu. Sie ist die fundamentalste Beziehung in der Thermodynamik und sagt aus, dass die Summe der materiellen Zeitableitungen der inneren und kinetischen Energie gleich ist der mechanischen Arbeit und der Wärme.

In der Kontinuumsmechanik ist wohl bekannt, dass die Anzahl der unbekanntten Feldfunktionen die Anzahl der bekannten Bilanzgleichungen übersteigt. Dies bedeutet, dass das Feldproblem nicht lösbar ist. Es muss daher nach zusätzlichen Gleichungen gesucht werden, um das Problem zu schließen. Dies gelingt mit der Einführung von konstitutiven Beziehungen (Stoffgleichungen), die die unbekanntten Feldfunktionen mit Werkstoffkenngrößen verbindet, die aus Experimenten gewonnen werden. Das bekannteste Beispiel für



(4) Bewegung der materiellen Punkte eines binären Modells (Festkörper S, Flüssigkeit F) im Kontrollraum.



(5) Ausschnitt aus der Auswertung des zweiten Hauptsatzes der Thermodynamik zur Gewinnung von Restriktionen für konstitutive Gleichungen.

eine solche Stoffgleichung ist wohl das Hooke'sche Gesetz bei Springfedern, das die Federkraft über Materialkonstanten mit der Dehnung der Feder verknüpft.

Konstitutive Beziehungen

In der Vergangenheit ist eine große Zahl von konstitutiven Gleichungen entsprechend dem unterschiedlichen Werkstoffverhalten der porösen Festkörper und ihrer Inhaltsstoffe entwickelt worden. Allerdings sind viele solcher Stoffgleichungen zu speziell und zu kompliziert. Sie genügen zwar den speziellen Versuchsergebnissen, die an einfachen Proben gewonnen werden. Für allgemeine dreidimensionale Formänderungs- und Kräftezustände sind sie allerdings nicht akzeptabel, da sie in den meisten Fällen übergeordneten Prinzipien widersprechen, die in den fünfziger und sechziger Jahren des vorigen Jahrhunderts entwickelt worden sind. Die wichtigsten Prinzipien sind das Objektivitäts- und Dissipationsprinzip. Das Objektivitätsprinzip besagt, dass die konstitutiven Gleichungen in der Weise formuliert werden müssen, dass sie nicht durch überlagerte Starrkörperbewegungen beeinflusst werden. Das Dissipationsprinzip resultiert aus dem zweiten Hauptsatz der Thermodynamik (Entropieprinzip) und liefert strenge Restriktionen für die konstitutiven Gleichungen (Abb. 5). Restriktionen ergeben sich ebenfalls aus kinematischen Zwängen wie zum Beispiel aus der Inkompressibilitätsbedingung für das wirkliche Material sowie aus der so genannten Saturierungsbedingung zur Aufrechterhaltung der Sättigung des porösen Festkörpers. Insbesondere der letztgenannte Zwang hat einen großen Einfluss auf die Stoffgleichungen poröser Festkörper; er bewirkt nämlich die Aufspaltung des inneren Kräftezustandes in einen Anteil, der aus dem Flüssigkeits- oder Gasdruck stammt und einen Anteil, den die Bewegung des Festkörpers bewirkt, und dies unab-

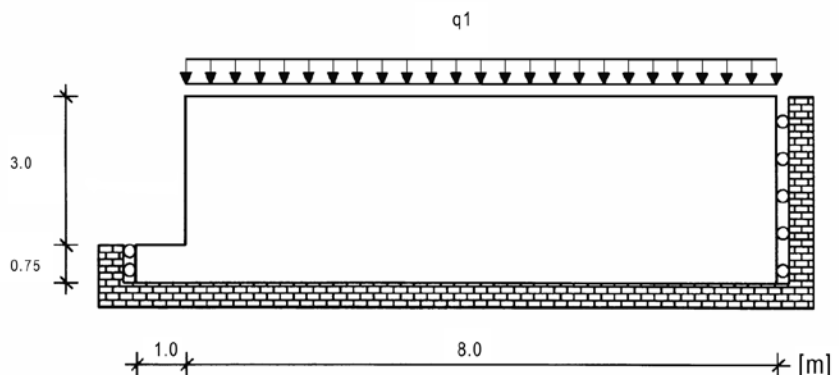


(6) Der schiefe Kirchturm von Suurhusen.
Quelle: Heiko Reints, Hinte, reints@kirche-suurhusen.de

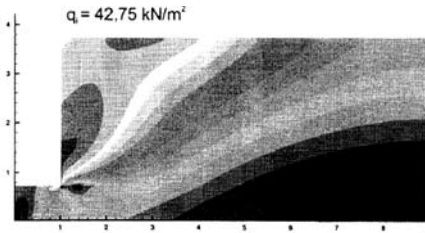
hängig von speziellen Werkstoffverhalten wie elastischen und plastischen Formänderungen (Konzept der effektiven Spannungen). Dies unterscheidet die Stoffgleichungen der saturierten porösen Materialien grundsätzlich von Einkomponenten-Stoffen oder von Gemischen.

In den letzten Jahren ist es gelungen, das zeitunabhängige Materialverhalten der porösen Festkörper sowohl im elastischen als auch im plastischen Bereich zu beschreiben. In neuerer Zeit sind auch viskose Festkörperskelette erfolgreich durch Stoffgleichungen beschrieben worden, die explizit von der Zeit abhängen. Außer dem

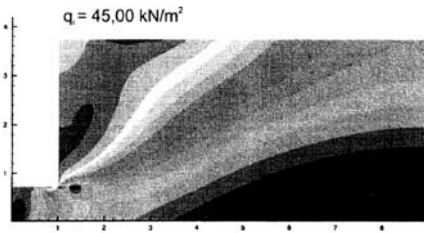
Stoffverhalten der porösen Festkörper muss natürlich auch das physikalische Verhalten der Inhaltsstoffe, wie Flüssigkeiten und Gase, untersucht werden. Dies ist inzwischen geschehen und zwar für ideale und zähe Flüssigkeiten sowie für ideale Gase. Damit liegen konstitutive Gleichungen für die Festkörpermatrix und für die Inhaltsstoffe vor, die einen weiten Bereich in der Beschreibung des mechanischen Verhaltens der im Ingenieurwesen und in der Biomechanik bekannten Stoffe abdecken. Es ist aber nicht allein damit getan, konstitutive Beziehungen für den porösen Körper und für die Inhaltsstoffe zu entwickeln. Viel-



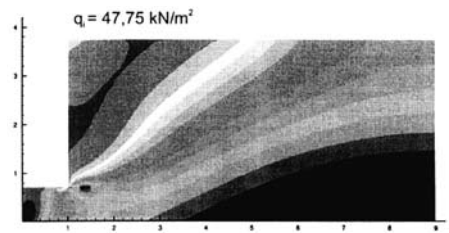
(7) Simulation des Versagens einer Böschung.
Quelle: Dissertation Skolnik 1999



(8) Vergleichsspannungen infolge zunehmender Belastung.
Quelle: Dissertation Skolnik 1999



(9) Vergleichsspannungen infolge zunehmender Belastung.
Quelle: Dissertation Skolnik 1999



(10) Vergleichsspannungen infolge zunehmender Belastung.
Quelle: Dissertation Skolnik 1999

mehr müssen, um das gesamte thermomechanische Verhalten des gefüllten porösen Körpers beschreiben zu können, auch die Interaktionskräfte zwischen den Konstituierenden in die konstitutive Theorie einbezogen werden. Dies ist weitgehend gelungen. Zum einen konnten die Reibungskräfte zwischen den Konstituierenden als Volumenkräfte beschrieben werden (Gesetz von Darcy), zum anderen wurde in jüngster Zeit in Essen und San Diego das Problem der Kapillarität in porösen Körpern erfolgreich gelöst. Zudem konnten konstitutive Gleichungen für die Kapillarkräfte abgeleitet werden, die die Interaktionen zwischen den Konstituierenden, Festkörper und Flüssigkeit, erfassen.

Anwendungen

Die Theorie poröser Medien ist ein effektives Werkzeug zur Beschreibung des thermomechanischen Verhaltens von saturierten oder leeren Festkörpern. Im Folgenden werden einige wissenschaftliche, aber auch praxisorientierte Problemstellungen hinsichtlich der Anwendung der TPM aufgezeigt und diskutiert.

Für die rechnerische Behandlung von Rand- und Anfangswertproblemen sind grundsätzlich zwei Wege möglich, nämlich die analytische und die numerische Berechnung. Die analytische Berechnung ist allerdings nur für wenige einfache Rand- und Anfangswertprobleme möglich, wobei zusätzlich noch Einschränkungen bezüglich des Materialverhaltens der Phasen gemacht werden müssen. Deshalb verwendet

man heutzutage in zunehmendem Maße numerische Verfahren, wie die Methode der finiten Elemente (FE-Methode). Bei diesem Verfahren wird das Gebiet in eine Anzahl von Teilgebieten (Elemente) endlicher (finiter) Größe zerlegt. Die beschreibenden Feldgleichungen des Problems werden dann näherungsweise im Rahmen der gewählten Ansätze für die Freiwerte (zum Beispiel für die Verschiebung des Festkörpers und für die Filtergeschwindigkeiten sowie für den Porenwasserdruck oder Ähnliches) im Teilgebiet unter Berücksichtigung der Rand- und Anfangsbedingungen sowie der Übergangsbedingungen im Inneren gelöst.

Einen „idealen Nährboden“ hinsichtlich der Anwendung findet die TPM im Bereich des Grundbaus und der Bodenmechanik; zum einen deshalb, weil die meisten Geomaterialien (Sand, Ton, Lehm) die Voraussetzung bezüglich der statistischen Verteilung der Poren erfüllen und zum anderen, weil in der Geowissenschaft eine Vielzahl der Aufgaben mit Mehrphasensystemen zu tun hat.

Eine der bekanntesten Problemstellungen des Grund- und Erdbaus ist wohl die Konsolidation. Das zeitliche Verformungsverhalten läuft wie folgt ab: Bei Belastung werden zunächst die aus der äußeren Beanspruchung resultierenden Spannungen nahezu vollständig vom Porenwasser aufgenommen. Kann die Flüssigkeit im Laufe der Zeit abfließen, kommt es zu Spannungsumlagerungen, indem die Spannungen auf den Festkörper, zum Beispiel auf das Korngerüst, übertragen werden. Dieser Vorgang

ist mit Setzungen (abwärtsgerichtete Bewegung des Bodenkörpers infolge Verdichtung) und damit auch mit der Veränderung der Porenanteile und der Porenstruktur verbunden. Der zeitliche Verlauf der Verformungen wird im Wesentlichen von dem Widerstand des Materials gegenüber der Porenwasserströmung bestimmt und kann, abhängig vom anstehenden Baugrund, bis zum Erreichen der Endverformungen mehrere Jahre oder Jahrzehnte betragen. Als Beispiel hierfür sei der schiefste Turm der Welt angeführt – der Turm von Suurhusen (Abb. 6). Bei diesem Kirchturm in Ostfriesland, erbaut um 1450, wurden Seitwärtsauslenkungen beobachtet und später auch gemessen. Bis zum heutigen Tag hat sich der Turm von Suurhusen um 5,07 Grad aus der Senkrechten geneigt und ist somit, bezogen auf den Neigungswinkel, schiefere als der berühmte schiefe Turm von Pisa (Neigungswinkel: 3,97 Grad).

Die TPM in Verbindung mit der Methode der finiten Elemente ist natürlich nicht nur auf die Modellierung und Simulation des klassischen Konsolidationsproblems beschränkt. Vielmehr lässt sich auch das Versagen von bestimmten saturierten Bodenkörpern simulieren, zu denen unter anderem Dämme, Baugruben und Böschungen gehören.

Im Folgenden werden die Ergebnisse einer Stabilitätsuntersuchung mit der FE-Methode einer senkrechten Böschung eines kohäsiven saturierten Bodens diskutiert². Die Böschung wird durch eine Flächenlast beansprucht (Abb. 7), die schrittweise bis zum Erreichen der maximal aufnehmbaren Last gesteigert wird.

Die plastischen Zonen bilden sich zunächst im Bereich der Böschung kurz oberhalb der Baugrubensohle und rechts der Böschung im Bereich der Geländeoberkante aus. Mit Steigerung der Last nähern sich die plastischen Zonen an, indem sie sich vergrößern. Das Versagen der Böschung tritt ein, wenn sich auf Grund der kritischen Flächenlast eine durchgehende plastische Zone (Gleitfuge) bildet (Abb. 8, 9, 10).

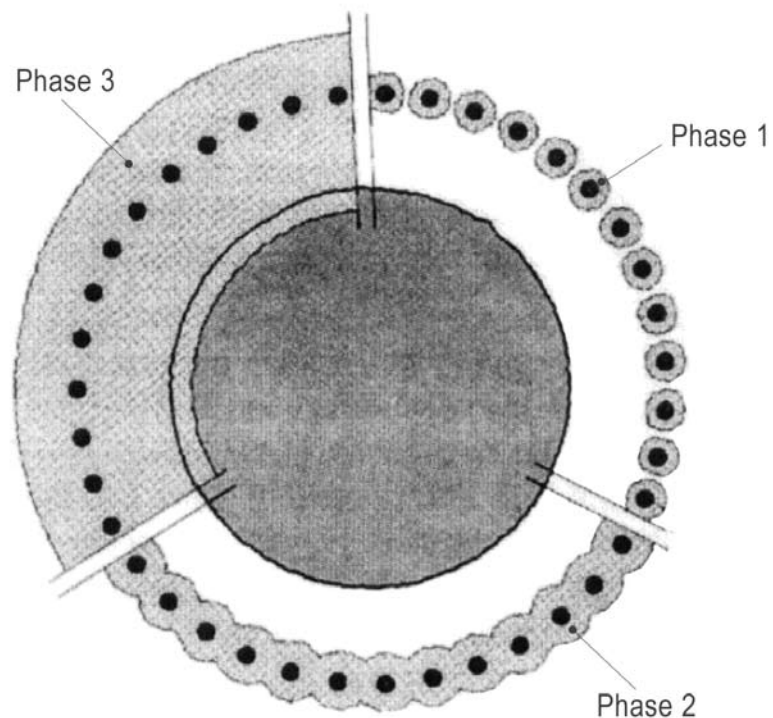
Die Simulation zeigt, was auch durch Berechnungen anderer Problemstellungen bestätigt wird, dass die Poreninhaltsstoffe einen nicht zu unterschätzenden Einfluss auf die Ausbreitung der plastischen Zonen und somit auf das Versagen eines Bodenkörpers hat. Die kritischen Spannungszustände des Festkörpers sind abhängig von den auftretenden Verformungen. Diese stehen im direkten Zusammenhang mit dem Strömungsverhalten des Poreninhalts und beeinflussen somit, wie, wann und wo sich die so genannten effektiven Spannungen des Festkörpers und somit auch die kritischen Spannungskombinationen aufbauen. Erreichen diese Kombinationen einen bestimmten Wert, so kommt es zu Spannungsumlagerungen, das heißt, die Spannungskombinationen können nicht wie bei elastischen Materialien proportional gesteigert werden, und zur Bildung plastischer Bereiche, die letztendlich in einen Bruchzustand übergehen können. Das Erreichen des Bruchzustands muss sich nicht durch plastische Deformationen ankündigen, der Bruch kann auch plötzlich auftreten. Welche Aktualität die Simulation von Versagenszuständen in saturierten Bodenkörpern hat und welchen Stellenwert in volkswirtschaftlicher Hinsicht Aussagen bezüglich der Standsicherheit von Binnenwasserdeichen beizumessen ist, verdeutlicht die Elbe-Flutkatastrophe von 2002.

Ein weiteres Anwendungsgebiet der TPM im Bereich des Ingenieurwesens ist die Untersu-

chung der Ausbreitung von elastischen Wellen und Schallwellen in flüssigkeits- und/oder gasgefüllten porösen Festkörpern. Messungen zeigen, dass sich im Gegensatz zu Ein-Komponenten-Kontinua in einem Mehrphasensystem infolge transients Erregung mehrere Längs- und Querwellen (Longitudinal- und Transversalwellen) auftreten. Der Grund dafür ist, dass die einzelnen Konstituierenden, bedingt durch die verschiedenartigen Stoffeigenschaften, unterschiedliche Wellenausbreitungsgeschwindigkeiten besitzen. Analytische und numerische Untersuchungen der Wellenausbreitung bei Verwendung eines binären Modells mit inkompressiblen Phasen zeigen, dass sich nur eine Longitudinalwelle auf Grund der elastischen volumetrischen Deformation des Festkörpers, die bei dem betrachteten Modell aus der Änderung des Porenraums resultiert, ausbreitet. Die Kompressionswelle in der Flüssigkeit breitet sich auf Grund der Inkompressibilität mit unendlich

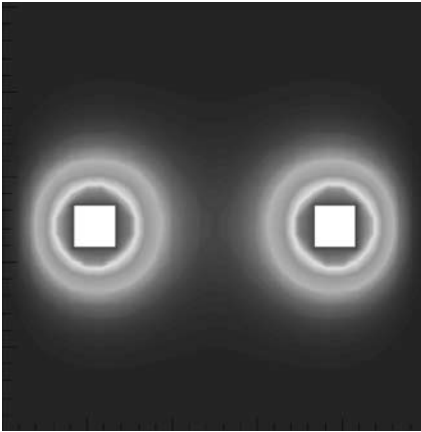
großer Geschwindigkeit aus. Zur Bestätigung der Ergebnisse sind analytische Berechnungen einfacher Rand- und Anfangswertaufgaben durchgeführt worden. Die Berechnungen auf der Basis von Modellen mit kompressiblen Phasen oder kompressiblen und inkompressiblen Phasen (hybride Modelle) zeigen, dass sich bei Berücksichtigung der Kompressibilität der Poreninhaltsstoffe sowie des realen Festkörpers mehrere Längs- bzw. Kompressionswellen im Kontrollraum des Festkörpers fortpflanzen. Die Existenz mehrerer Longitudinalwellen wird auch durch Messdaten aus Feldversuchen bestätigt. Bezüglich der Ausbreitung von Scherwellen wurde lediglich die Transversalwelle im Festkörper untersucht. Weitere Querwellen traten nicht auf, da Viskositäten der Poreninhaltsstoffe zur Aufnahme von Schubspannungen noch nicht modelliert wurden.

Im Rahmen der analytischen und numerischen Studien sind neben den Longitudinal- und Transversalwel-

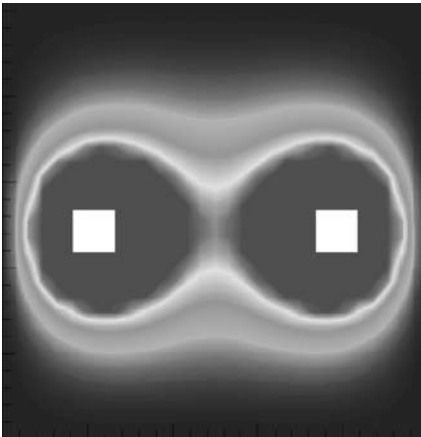


(11) Verlauf der Frostzonen in verschiedenen zeitlichen Phasen.

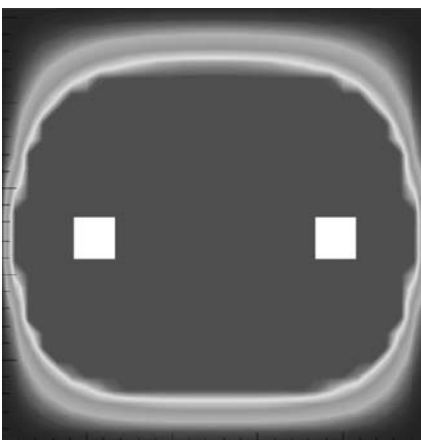
Quelle: Dissertation Wähling 2002



(12) Verlauf der Frostzone nach 10 Stunden (numerische Simulation).
Quelle: Dissertation Wähling 2002



(13) Verlauf der Frostzone nach 20 Stunden (numerische Simulation).
Quelle: Dissertation Wähling 2002



(14) Verlauf der Frostzone nach 60 Stunden (numerische Simulation).
Quelle: Dissertation Wähling 2002

len auch Oberflächenwellen untersucht worden. Im Gegensatz zu den Raumwellen breiten sich die Oberflächenwellen langsamer aus, sie sind aber energiereicher und spielen bei der Untersuchung von Erdbeben eine wichtige Rolle. Die Love-Welle ist die schnellste der Oberflächenwellen und erzeugt Bewegungen in horizontaler Richtung. Die Rayleigh-Wellen sind ähnlich zu Meereswellen, deren Amplituden jedoch wesentlich größer sind als die der zuvor erwähnten Wellen. Die meisten Erschütterungen, die man bei einem Erdbeben spürt, sind in der Regel Rayleigh-Wellen.

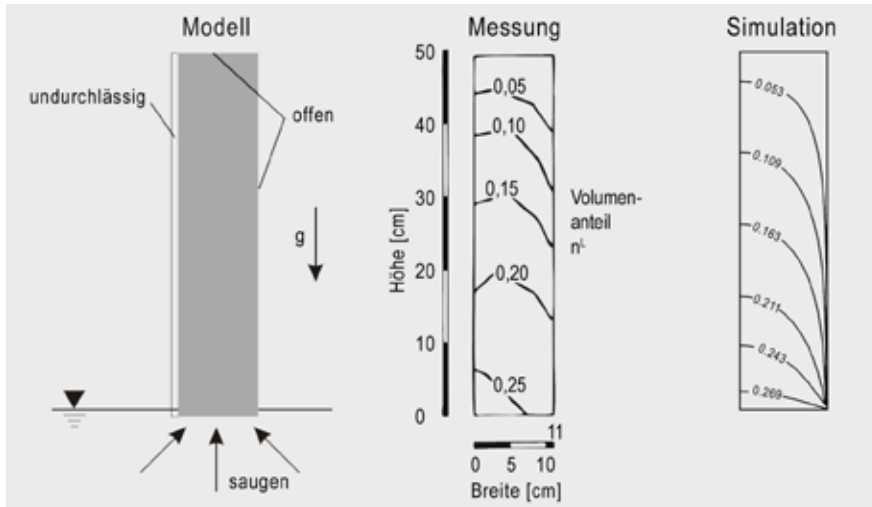
Durch die Berücksichtigung von Massenquelltermen – im negativen wie auch im positiven Sinne – bei der Modellbildung, lassen sich neben den bereits diskutierten Problemstellungen auch Phasenübergänge in gesättigten porösen Festkörpern beschreiben. Zum Beispiel in der Verfahrenstechnik und der Materialwissenschaft sowie in der Biotechnologie ist man an der Beschreibung von Trocknungsprozessen poröser Stoffe (Schüttgüter, keramische Stoffe, hydraulisch gebundene Baustoffe wie Gipse und Putze sowie Futter- und Lebensmittel) interessiert. Bei diesen Prozessen wird der Phasenübergang Flüssigkeit in Wasserdampf begleitet durch Flüssigkeits- und Gasbewegungen in Verbindung mit thermischen Prozessen und Deformationen des Festkörpers. Die theoretische und numerische Beschreibung von Trocknungsprozessen hat Kowalski³ vollzogen.

Am Institut für Mechanik werden Mehr-Phasen-Modelle zur Beschreibung von Frost- und Tauvorgängen in porösen Materialien entwickelt. Mit dem einfachen Modell, einem ternären Modell, bestehend aus zwei festen Phasen (poröse Festkörpermatrix und Eis) und einer flüssigen Phase (Wasser), lassen sich bereits praxisorientierte Problemstellungen, so auch die künstliche Vereisung von Böden, simulieren. Dieses Verfahren wird unter anderem im Tunnelbau zum

Vortrieb in nichtbindigen Böden angewandt, wobei man sich die erhöhte Festigkeit und die gegen Null gehende Durchlässigkeit des Bodens zu Nutze macht. Im Bergbau kommt dieses Verfahren wegen der überschaubaren Risiken beim Abteufen von Tagesschächten zum Zuge.

Der Verlauf der Frostzonen – Bildung von Frostkörpern, Zusammenwachsen der Frostkörper und Bildung eines Frostmantels – ist in Abbildung 11 dargestellt. Die Abbildungen 12, 13 und 14 zeigen die Ergebnisse der numerischen Simulation der Frostausbreitung zwischen zwei Gefrierrohren. Es wurde dabei auch die Expansion des Eises berücksichtigt sowie die Problematik einer sich bewegenden Eisfront behandelt, die Ähnlichkeiten mit dem Stefan-Problem aufweist⁴.

Im Hinblick auf die Beschreibung von Frost- und Tauprozessen für die Untersuchung der Frostbeständigkeit von Normal- und Hochleistungsbetons wird momentan das ternäre Modell (Festkörper, Eis und Wasser) auf ein quintäres Modell erweitert, das heißt es wird zusätzlich eine Gas- und eine Gelwasserphase (strukturiertes Wasser) berücksichtigt. Theoretisch werden somit die Mikro-Ebene und auch die Nano-Ebene berührt. Auf diesen Skalen hat auch die Kapillarität, auf die anschließend noch näher eingegangen wird, einen entscheidenden Einfluss auf die zu beschreibenden Prozesse. Auf Grund der physikalischen Eigenschaft des Gelwassers in den Nanoporen tritt ein Pumpeffekt während der Frost- und Tauvorgänge auf. Dies bedeutet, dass der Beton zusätzlich vorhandenes externes Wasser aufnehmen kann, das das vorhandene Gas langsam verdrängt. Kontrollierte Frost- und Tauzyklen an kapillar-gesättigten Betonproben zeigen, dass die Wasseraufnahme der Proben infolge dieses Pumpprozesses um ein Vielfaches größer ist als die Aufnahme von Wasser durch Kapillarität. Dieses führt schließlich zu einer vollständigen Wassersätti-



(15) Kapillarer Aufstieg des Wassers in einem Kalksandstein.
Quelle: Dissertation Ricken 2002

gung des Körpers, so dass sich bei weiteren Zyklen infolge der Expansion des Eises Risse einstellen bzw. es zum Bruchversagen kommt. Das quintäre Modell sowie erste Berechnungsergebnisse wurden jüngst von einer Arbeitsgruppe Mechanik/ Materialwissenschaften vorgestellt.

Wie bereits erwähnt, spielt die Kapillarität, das heißt der Flüssigkeitstransport infolge einwirkender Oberflächenspannungen, die aus den zwischen den Molekülen wirkenden van der Waals'schen Kräften resultieren, bei flüssigkeits- und gasgefüllten porösen Körpern eine wichtige Rolle. Sie ist deshalb für viele Forschungsgebiete von großem Interesse. Denkt man an den Flüssigkeitstransport in Pflanzen oder an den Transport von Wasser in Mineralsalzen im Erdinneren, so zeigt sich, dass selbst die Natur sich dieses Phänomen in vielen Bereichen zu Nutze gemacht hat. Der Transport der Flüssigkeit in Röhren, Poren oder Spalten kann über große Höhen bzw. Strecken geschehen. Unerwünschte Erscheinungen dieses Transportverhaltens gibt es natürlich auch, beispielsweise Feuchteschäden an Bauwerken insbesondere an historischen Gebäuden.

In jüngster Zeit ist es erstmalig gelungen, das Phänomen der Kapillarität im Rahmen einer makroskopischen Theorie physikalisch korrekt

zu erfassen, nämlich als Interaktionskräfte zwischen den einzelnen Phasen⁵. Dies bedeutet, dass das Phänomen der Kapillarität durch Volumenkräfte beschrieben wird, und nicht wie üblich im Rahmen einer makroskopischen Mehrphasentheorie mit Hilfe eines so genannten van Genuchten-Modells. Dieses Modell basiert auf einem konstitutiven Ansatz für den Drucksprung zwischen der Flüssigkeit und dem Gas. Die neueren Überlegungen zur Erfassung der Oberflächenspannungen an den Phasengrenzen führten dazu, die aus diesen Spannungen resultierenden Kräfte makroskopisch mittels der Dichtegradienten zu berücksichtigen. Damit ist nicht nur möglich, die Kapillarkraft zwischen der flüssigen und gasförmigen Phase zu formulieren, sondern auch Kräfte zwischen der Flüssigkeit und dem Festkörper sowie zwischen dem Gas und dem Festkörper zu beschreiben. Gerade die Wechselwirkung zwischen der flüssigen und der festen Konstituierenden spielt eine entscheidende Rolle bei der Simulation der Flüssigkeitsbewegung auf Grund von Kapillareffekten. Mit dem van Genuchten-Modell lassen sich makroskopisch solche Vorgänge nicht beschreiben. Es ist selbstverständlich, dass das bekannte van Genuchten-Modell aus dem entwickelten Modell nur für Sonderfälle

mit stark vereinfachten Annahmen ableitbar ist. Weiterhin versteht es sich, dass Effekte wie Kapillaraszension (Festkörper, Luft und Wasser) und Kapillardepression (Festkörper, Luft und Quecksilber) sowie die Hysterese, die sich beim Be- und Entwässern kapillar aktiver Materialien einstellt, mit dem neuen Modell erfasst werden können.

Die Effizienz dieses Modells soll anhand der Simulation der Feuchtwanderung eines Mauersteinmodells aus Kalksandstein demonstriert werden (Abb. 15). Ein Vergleich mit den gemessenen Daten zeigt die gute Übereinstimmung zwischen Experiment und Simulation⁵.

Schlussbemerkung

Mit der Schaffung einer konsistenten Theorie poröser Materialien (Medien) ist es nicht nur gelungen, den Ingenieuren in den unterschiedlichen Sparten und den Biomechanikern ein „Werkzeug“ für die Lösung von Rand- und Anfangswertproblemen zur Verfügung zu stellen, sondern auch den Wissenschaftlern, die im Grundlagenbereich forschend tätig sind, eine Basis für weitere wissenschaftliche Untersuchungen zu vermitteln. Die Entwicklung dieser Theorie wurde stark von der Essener Mechanik-Schule geprägt mit zahlreichen Veröffentlichungen in internationalen Zeitschriften, Fachbüchern, Vorträgen auf Kongressen und durch das Veranlassen von Symposien. Darüber hinaus fanden Ideen der Essener Mechanik-Schule durch Schüler und Stipendiaten weltweite Verbreitung. Die Arbeiten des Instituts für Mechanik sind durch Forschungsgemeinschaften gefördert und mit Einladungen zu Hauptvorträgen und Auftragsartikeln in renommierten Zeitschriften anerkannt worden.

Summary

Classical continuum mechanical theories such as the linear elasticity

theory and plasticity theory are based on the fundamental assumption that the material points of the matter in consideration are homogeneously distributed over a control space shaped by the porous solid. However, there are materials used in engineering science and biomechanics which contain closed and open pores filled with liquid and/or gas. Due to the different material properties and the different motions, there may be interaction between the constituents.

Theoretical modelling of these heterogeneously composed continua is extremely complicated owing to the complex geometric configuration of the pore space. The pores have, in general, different sizes and shapes. These vary between rough and fine pores in mud-avalanches and in filters with pores in the nano-range. With the realization of the enormous complexity of porous media geometry and of the mechanics of multiphase bodies, from the very early stages of research, a phenomenological approach to the subject has been evolved. This approach is based on the volume fraction concept, where it is assumed that the porous solid always models a control space. Furthermore, it is assumed that the pores are statistically distributed and that an arbitrary volume element of the control space is composed of the volume elements of the real constituents. The relations between elements of the control space and the real constituents are given by volume fractions. The volume fraction concept is a very rigorous condition in order to create homogenized ("smeared") continua, which can be treated by continuum mechanical methods. The homogenized porous medium features almost the same properties as mixtures of liquids and gases, for which a consistent thermomechanical theory, i.e. the mixture theory, exists. The main assumption of the mixture theory is that the material points of all constituents approximately cover a spatial point, which is also valid for the homogenized

porous medium. Thus, all fundamental terms and relations, such as kinematics and balance equations, can be taken from the mixture theory.

However, some special features of the porous medium must be considered, in particular, phenomena on the microscale.

The Theory of Porous Media (TPM) has come to a certain close in recent years. All essential phenomena in saturated and partly saturated porous solids like uplift, friction, capillarity, and effective stresses have been theoretically founded. Moreover, the constitutive theory has made great progress. Today, theories for elastic, plastic, viscoelastic and viscoplastic behaviour of the porous solids as well as for the liquid and gas phases exist. Also, many applications in engineering and biomechanics have been carried out. These concern, for example, problems in soil mechanics (consolidation, phase transitions, wave propagation), material sciences (powder compaction), building physics (capillarity) as well as biomechanics (transport of ions). However, in the field of applications there is still a need for further investigation.

Anmerkungen

- 1) de Boer 2000
- 2) Skolnik 1999
- 3) Kowalski 2003
- 4) Wähling 2002
- 5) de Boer, Didwania 2002
- 6) Ricken 2002

Literatur

- de Boer, R.: Theory of porous media: Highlights in the historical development and current state, Berlin, Heidelberg, New York 2000.
- de Boer, R., Didwania, A. K.: Capillarity in porous bodies: Contributions of the Vienna school and recent findings, in Acta Mechanica 159/2002, 173-188.
- Kowalski, S. J.: Thermomechanics of drying processes, in Berlin, Heidelberg, New York 2003.
- Ricken, T.: Kapillarität in porösen Medien – theoretische Untersuchungen und numerische

Simulation, Dissertation, Fachbereich Bauwesen, Universität Essen, Aachen 2002.

– Skolnik, J.: Numerische Simulation elastisch-plastischer Deformationen fluid-saturierter poröser Medien, Dissertation, Fachbereich Bauwesen, Universität Essen, Aachen 1999.

– Wähling, M.: Thermomechanische Prozesse in porösen Medien unter Berücksichtigung von Phasenübergängen, Dissertation, Fachbereich Bauwesen, Universität Essen, Aachen 2002.

Die Autoren

Reint de Boer studierte Bauingenieurwesen an der damaligen Technischen Hochschule Hannover; er schloss das Studium 1962 mit der Diplomprüfung ab. Anschließend wurde er Assistent und später Oberingenieur am dortigen Lehrstuhl für Baumechanik. Mit einer Dissertation über ein Problem aus der mechanischen Umformtechnik wurde er 1966 zum Dr.-Ing. promoviert. Es folgte die Habilitation für das Fach Mechanik im Jahre 1970 mit einem Thema aus der Strukturmechanik. Diesem Thema blieb Reint de Boer auch in den folgenden Jahren in seiner Forschungs- und Lehrtätigkeit treu. Nach Studien an der Technischen Hochschule in Wien folgte in den Jahren 1975/1976 ein Forschungsaufenthalt an der UC Berkeley, USA, bei den Professoren Karl Pister und Paul Naghdi. Diese Begegnung mit führenden amerikanischen Wissenschaftlern hatte großen Einfluss auf den Wissenschaftler Reint de Boer. Aus dieser Zeit stammte auch sein wachsendes Interesse an der Kontinuumsmechanik und ihren mathematischen Grundlagen. Dieses Wissen ließ er im Jahre 1982 in ein Buch einfließen, das seit längerem vergriffen ist.

Nach dem Jahr in Berkeley kam der Ruf auf die Professur für Technische Mechanik an der Universität-Gesamthochschule Essen. Hier war Reint de Boer nicht nur als Hochschullehrer und Forscher gefordert. Er arbeitete in verschiedenen Gremien mit, unter anderem wirkte er zwölf Jahre als Vorsitzender des Prüfungsausschusses und als Prodekan und Dekan.

In seinen Forschungsarbeiten hat sich Reint de Boer ab dem Jahre 1983 der Theorie poröser Medien (TPM) verschrieben, die sein Hauptwerk mit vielen Veröffentlichungen in unterschiedlichsten internationalen Journalen und mehreren Fachbüchern sowie Vorträgen auf großen Konferenzen bestimmt. Darüber hinaus trat er als Organisator und Mitorganisator internationaler Symposien über die TPM hervor. Auf Einladung der chinesischen Regierung hat er 1992 über die TPM an verschiedenen Universitäten in China berichtet; von der Universität Chongqing wurde er bei dieser Gelegenheit zum Consultant Professor ernannt.

Zur Erforschung verschiedener Effekte auf der Mikroebene bei gesättigten und teilgesättigten porösen Körpern weilte Reint de Boer in den neunziger Jahren mehrere Male an den Universitäten in Los Angeles und San

Diego. Diese Forschungsaufenthalte und viele der grundlegenden Arbeiten wurden von der DFG und der Volkswagenstiftung gefördert. Einige Forschungsergebnisse haben ihren Niederschlag in Promotionen und Habilitationen gefunden.

Bei seinen Arbeiten stieß Reint de Boer auch auf den Wissenschaftsstreit zwischen den Wiener Professoren Fillunger und von Terzaghi, der so tragisch endete. Die Ergebnisse der historischen Aufarbeitung hat er zusammen mit seinen wissenschaftlichen Ergebnissen in den Büchern „Theory of Porous Media“ und „The Engineer and the Scandal“ niedergelegt.

Reint de Boer wurde Anfang 2001 emeritiert.

Joachim Bluhm studierte Bauingenieurwesen in Essen mit der Vertiefungsrichtung „Konstruktiver Ingenieurbau“. Seinen Abschluss als Diplom-Ingenieur absolvierte Bluhm 1985. Seit 1985 ist er als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Mechanik tätig. Joachim Bluhm wurde 1990 zum Dr.-Ing. promoviert mit einer Arbeit über theoretische und numerische Modelle zur finiten Elastoplastizität im Hinblick auf die Anwendung auf Stabtragwerke. Nach der Promotion wandte er sich der Theorie poröser Medien zu, insbesondere ihrer numerischen Umsetzung auf Rand- und Anfangswertprobleme. Er habilitierte sich mit einer Arbeit bezüglich der konsistenten Modellierung von Mehrphasensystemen im Fach Mechanik und erhielt die Lehrbefugnis an der damaligen Universität Essen. Seine wissenschaftlichen Ergebnisse hat er in anerkannten Mechanik-Zeitschriften veröffentlicht sowie auf internationalen Konferenzen und Symposien in Europa, Asien, Kanada und USA vorgestellt. Er ist unter anderem auch Mitherausgeber eines erst kürzlich erschienenen Buches über die Grundlagen, Anwendungen und Experimente im Bereich der Theorie poröser Medien.