Zeitschrift: Schweizer Ingenieur und Architekt

Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine

Band: 101 (1983)

Heft: 49

Artikel: Lehren und Lernen an der Ingenieurschule HTL: Entwicklung am Beispiel von Sickerströmungen

Autor: Schmidt, Robert

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-75248

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 22.02.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Lehren und Lernen an der Ingenieurschule HTL

Entwicklung am Beispiel von Sickerströmungen

Von Robert Schmidt, Horw

Sickerströmungen, wie sie im Grundbau vorkommen, konnten früher mit graphischen Methoden genügend genau gelöst werden. Die Resultate haben sich mit den billig gewordenen, leistungsfähigen Rechnern numerisch noch verfeinern lassen. Bei der Grundwasserbewirtschaftung sind aber heute technische Probleme aufgetaucht, die kompliziertere physikalische Zusammenhänge aufweisen und deren Lösungen mit der Finite-Elemente-Methode zu berechnen sind. Inwieweit diese Aufgaben aus der Praxis in den Lehrstoff einer Höheren Technischen Lehranstalt (HTL) aufgenommen worden sind, zeigt der Autor in vorliegendem Artikel, dem er Gedanken zum Lehren und Lernen an der Ingenieurschule anfügt.

Einleitung

Das *Zentralschweizerische Technikum* ist vor 25 Jahren gegründet worden. Die während dieser Zeitspanne vor sich gegangene *Entwicklung des Grundbaues* in Theorie und Praxis hat auch in der Ausbildung notwendigerweise Veränderungen gebracht. Auf der einen Seite steht die enorme Vermehrung der Kenntnisse in der Bodenmechanik, was theoretische Grundlagen, was Materialprüfung in Feld und Labor von Boden als Baugrund und Baustoff und was Berechnungsmethoden anbelangt; auf der andern Seite wurde in der Bauindustrie eine Vielzahl von neuen Grundbaugeräten und Grundbaumethoden für die Baustelle entwickelt.

Dem Dozenten an einer Ingenieurschule HTL stellt sich ein erstes Problem: Er muss aus der Überfülle von theoretischem und praktischem Wissen die minimale, aber wesentliche Auswahl treffen. Dann ist das zweite Problem zu bewältigen, nämlich das anspruchsvoller gewordene Wissen dem Studenten zu vermitteln.

Am Beispiel «Sickerströmungen» sollen die zunehmenden Ansprüche aufgezeigt werden, die der schwieriger und umfangreicher gewordene Stoff an den Lehrer als Vermittler und an den Studenten als Lernenden stellt. Danach soll diskutiert werden, wie man mit diesen Ansprüchen einigermassen zu Rande kommt.

Theoretischer Ansatz für die mathematische Behandlung von Sickerströmungen

Die Erfahrung zeigt, dass für Strömungen von Wasser durch ein Medium mit zusammenhängenden Poren – also z.B. eine Grundwasserströmung durch einen durchlässigen Boden – das Gesetz von *Darcy*

$$(1)\quad v = k \cdot J$$

eine gute Annäherung ist.

Dabei bedeutet v die Filtergeschwindigkeit und J das hydraulische Gefälle; k wird als Durchlässigkeitsbeiwert bezeichnet und hängt von den Eigenschaften des porösen Mediums und von denjenigen der Flüssigkeit ab. Das Gesetz von Darcy kann anhand eines eindimensionalen Strömungsmodells auf empirischem Weg gewonnen werden.

Für ebene Sickerströmungen erweitert man das Gesetz von Darcy in einer x-z-Ebene so:

$$(2)\quad v_x = k_x \cdot J_x$$

$$(3)\quad v_z = k_z \cdot J_z$$

$$(4)\quad J_x = \frac{\partial h}{\partial x}$$

$$(5)\quad J_z = \frac{\partial h}{\partial z}$$

Dabei stehen die Indizes x, z für die x- bzw. z-Richtung; h ist die hydraulische Druckhöhe im Punkt (X, Z) des durchströmten porösen Mediums.

Setzt man die Kontinuitätsbedingung voraus und nimmt man an, dass die Flüssigkeit nicht zusammendrückbar ist und dass weder Quellen noch Senken vorhanden sind, so folgt aus der Bilanz über ein Einheitsbodenelement – dass nämlich die in das Einheitsbodenelement eintretende Wassermenge der austretenden gleichzusetzen ist – die partielle Differentialgleichung

$$(6)\quad \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0$$

Ersetzt man weiter v_x und v_z durch die entsprechenden Beziehungen von Darcy, so erhält man die Gleichung

$$(7)\quad k_x \cdot \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + k_z \cdot \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0$$

Für isotrope und homogene Durchlässigkeitsverhältnisse des Mediums mit zusammenhängenden Poren vereinfacht sich die obige Gleichung auf

> "The problem of our time is the control of quantity—of births, energy, knowledge. We cannot assimilate, much less organize it in some meaningful pattern."
>
> *Lewis Mumford*, [1]

$$(8)\quad \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0$$

also auf die Laplace-Gleichung, die bekannte Grundgleichung der Potentialtheorie. Dieser Differentialgleichung genügt im allgemeinen als Lösung eine Potentialfunktion und eine Stromfunktion, die orthogonal zueinander sind.

Graphische Lösung von Sickerströmungsproblemen

Eine exakte mathematische Lösung der Potentialgleichung kann bekanntlich gefunden werden, indem man zu einer bekannten Lösung «Potentialfunktion» eine zugehörige «Stromfunktion» sucht, die miteinander durch die Cauchy-Riemannschen Differentialgleichungen verknüpft sind.

Da dieses mathematische Niveau an der Ingenieurschule HTL nicht erreicht wird, beschränkt man sich darauf, dem Studenten die Tatsachen

- eine Lösung «Stromfunktion»,
- eine Lösung «Potentialfunktion» und die
- Orthogonalität der beiden Funktionen

mitzuteilen und für einen einfachen Fall zu beweisen. So hat z.B. die «Spundwand mit begrenzter Tiefe im unendlichen durchlässigen isotropen und homogenen Halbraum» die Lösungen [2]:

Stromfunktion:

$$(9)\quad \frac{x^2}{t^2 \cdot \cosh^2\psi} + \frac{z^2}{t^2 \cdot \sinh^2\psi} = 1$$

Potentialfunktion:

$$(10)\quad \frac{x^2}{t^2 \cdot \cos^2\varphi} - \frac{z^2}{t^2 \cdot \sin^2\varphi} = 1$$

wobei

$$(11)\quad \psi = \operatorname{arsinh} \frac{x_s}{t}$$

und

$$(12)\quad \varphi = \arccos \frac{z_s}{t}$$

Die beiden Lösungsscharen sind in Bild 1 dargestellt.

Mit dem Parameter ψ der Stromfunktion kann eine Schar von Ellipsen, mit φ, demjenigen der Potentialfunktion, eine Schar von Hyperbeln erzeugt werden. Die Ellipsen stellen die Stromli-

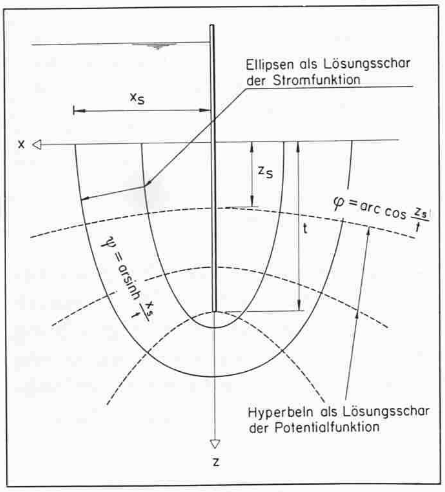


Bild 1. Ellipsen und Hyperbeln als orthogonale Funktionen. Beispiel von zwei Lösungsscharen der Potentialgleichung (nach Bölling)

nien, die Hyperbeln die Äquipotentiallinien des Strömungsproblems dar. t bedeutet die Eintauchtiefe der Spundwand. x_s ist gleich dem horizontalen Abstand des Schnittpunktes der jeweiligen Stromlinie mit der x-Axe vom Koordinatenursprung, z_s ist gleich dem aquivalenten Wert der jeweiligen Potentiallinie auf der z-Axe.

Auf der Tatsache der Orthogonalität aufbauend, wird nun der Student angeleitet, wie man Stromliniennetze graphisch konstruiert. Dazu können eine Reihe von Regeln gelten; die Regeln variieren etwas mit dem Problem. Man kann bei einem Strömungsproblem, dessen Ränder begrenzt sind, etwa folgendermassen vorgehen (Bild 2, [3]):

- Bekannt sind (Bild 2a):
  - Die höchste Äquipotentiallinie *1–2*
  - Die tiefste Äquipotentiallinie *3–4*
  - Die kürzeste (bzw. oberste bzw. innerste) Stromlinie *a–b–c–d–e–f*
  - Die längste (bzw. tiefste bzw. äusserste) Stromlinie *g–h*
- Nun entschliesst man sich, entweder die Zahl der Strömungskanäle oder diejenige der Äquipotentialstufen ganzzahlig zu wählen.
- An den Rändern des Strömungsbereiches trägt man die dazu senkrecht stehenden Richtungen von Stromlinien bzw. Äquipotentiallinien ein (Bild 2b).
- In einem Bereich, in dem die Strömung ungefähr schichtparallel ist, teilt man die Höhe in eine ganze Zahl von gleich breiten Strömungskanälen ein (*d, d, d*), vgl. Bild 2c. (Wählt man die Zahl der Äquipotentialstufen ganzzahlig, so erfolgt das Vorgehen analog).
- In den Bereichen, wo die Strömung eingeschnürt wird, teilt man die Durchflussbreite in progressiv zunehmende Strömungskanalbreiten ein, wobei die kleinsten Breiten den grössten Krümmungsradien benachbart sind (*a, b, c*), vgl. Bild 2c.
- Man zieht erste Stromlinien und passt Äquipotentiallinien so ein, dass sphärische Quadrate entstehen, die man kontinuierlich korrigiert.
- Zur genaueren Analyse und Kontrolle werden die Quadrate geviertelt; eine ebenso gute Kontrolle stammt von *Leliavsky,* der davon ausgeht, dass einem sphärischen Quadrat ein Kreis einbeschrieben werden kann, der alle vier Seiten berühren muss (Bild 2d).

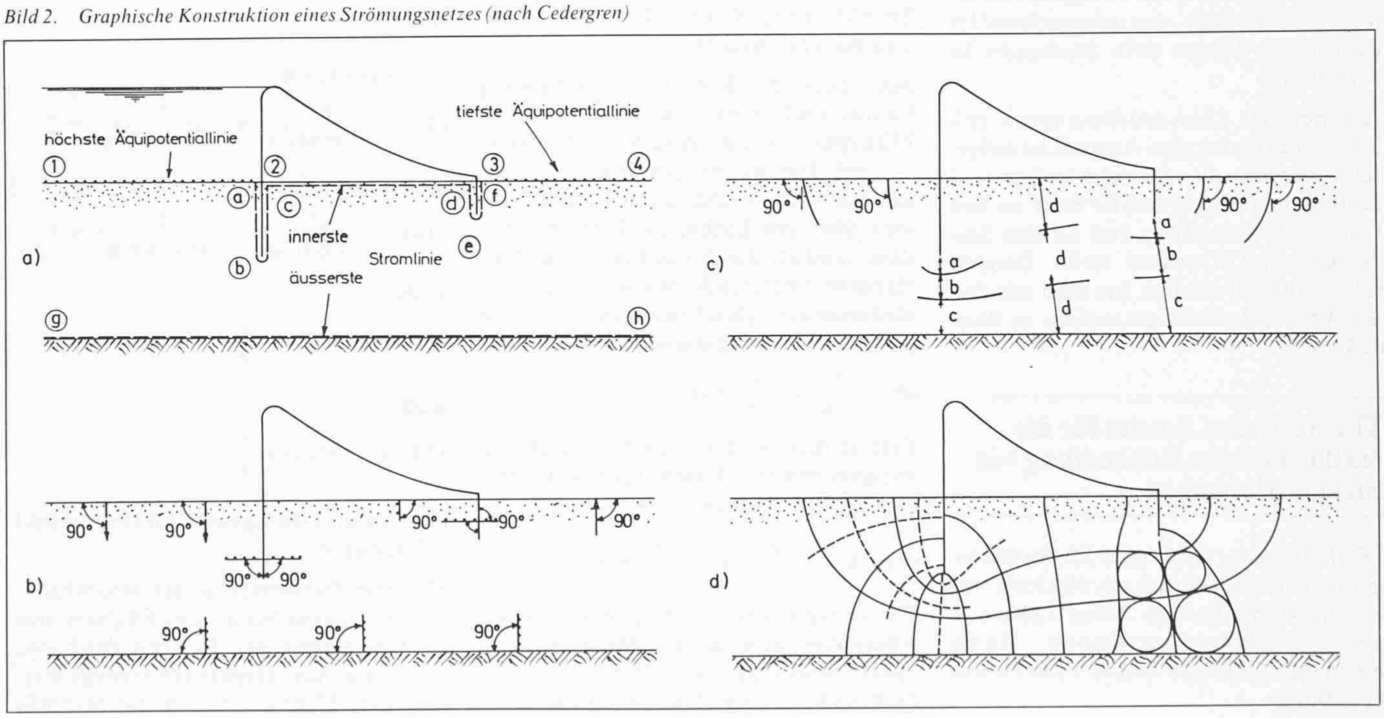
Die beschriebene Konstruktionsmethode kann benutzt werden für die eine Gruppe von Strömungsproblemen, nämlich diejenige, bei der die Strömung begrenzt ist, d.h. die Sättigungslinie bekannt ist. Es gibt eine zweite Gruppe von Problemen, bei der die obere Sättigungslinie, d.h. die oberste Stromlinie, nicht bekannt ist, also als zusätzliche Unbekannte gesucht werden muss. Dieses Problem stellt sich etwa bei Sickerströmungen durch Dämme.

Um die oberste Stromlinie bzw. den Hangwasserspiegel konstruieren zu können, kann man bei einem homogenen Damm von folgenden Voraussetzungen ausgehen:

- Die äusserste (freie) Stromlinie verbraucht im gleichen porösen Medium für gleiche Potentialdifferenzen gleichviel Höhe.
- Entsprechende Äquipotentiallinien müssen die äusserste (freie) Stromlinie auf der entsprechenden topographischen Höhe schneiden.
- Man kann diesen beiden Bedingungen genügen, indem man die äusserste freie Stromlinie und die Äquipotentiallinien auf einem Raster von Höhenlinien zum Schnitt bringt.

Viele natürliche Böden stellen nahezu horizontal geschichtete Sedimente dar; dabei ist die Durchlässigkeit parallel zur Sedimentationsebene oft um ein Vielfaches grösser als diejenige senkrecht dazu. Der wirkliche Boden wird daher durch ein Modell ersetzt, das aus einem porösen Medium besteht mit einem Durchlässigkeitsbeiwert k_H nach Darcy in horizontaler Richtung und einem solchen k_V in vertikaler Richtung. Man nennt solche porösen Medien querisotrop. Um auch für einen solchen Fall ein Stromliniennetz konstruieren und dabei die Vorteile der Or-

Bild 2. Graphische Konstruktion eines Strömungsnetzes (nach Cedergren)



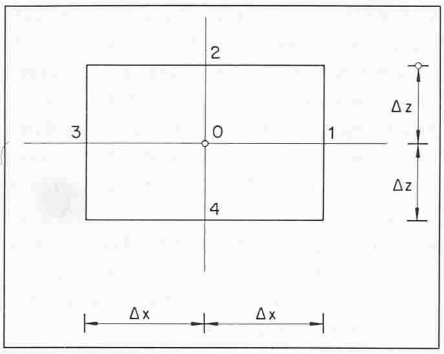


Bild 3. *Mascheneinteilung*

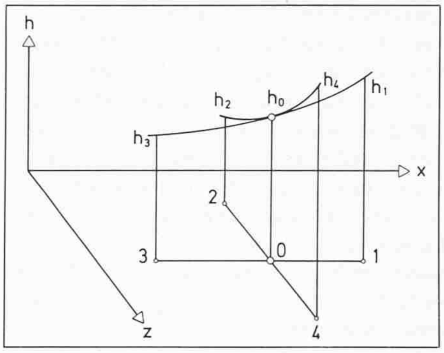


Bild 4. *Potentialfunktion h = h (x, z)*

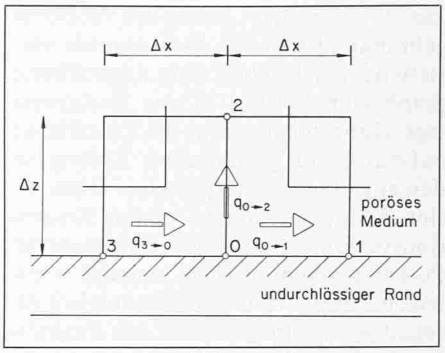


Bild 5. *Randwertproblem*

thogonalität benutzen zu können, wird der Massstab der Zeichnung in horizontaler Richtung reduziert, indem alle horizontalen Masse mit dem Wert $\sqrt{k_V/k_H}$ multipliziert werden [4]. Hat man das orthogonale (verzerrte) Netz konstruiert, so können die Ingenieurfragen gelöst werden, indem man bei allfälligen Berechnungen den Verzerrungsfaktor einführt, beispielsweise wie folgt:

Die Sickerwassermenge betrug beim homogenen isotropen porösen Medium

$$(13)\quad Q = k \cdot h \cdot \frac{m}{n}$$

wobei h die hydraulische Druckhöhendifferenz ist zwischen Ober- und Unterwasser, k der Durchlässigkeitsbeiwert nach Darcy für ein homogenes isotropes poröses Medium, m die Anzahl der Strömungskanäle, n die Anzahl der Potentialstufen.

Beim querisotropen Medium lautet die Lösung:

$$(14)\quad Q = \sqrt{k_H \cdot k_V} \cdot h \cdot \frac{m}{n}$$

Ist ein solches Stromliniennetz einmal konstruiert, so können damit die üblichen Ingenieurfragen beantwortet werden, wie diejenige nach Sickermenge, Spitzengradient, Austrittsgradient, Auftrieb etc.

Numerische Verfeinerung der graphischen Lösungsmethode

Die graphische Lösungstechnik war solange optimal, als die üblichen Ingenieurberechnungen mit Rechenschiebergenauigkeit erfolgten. Ein schneller mechanischer Rechner, der Resultate aus den vier Grundoperationen auf z.B. 8 Stellen lieferte, kostete um 1960 noch um Fr. 4000.- und kam damit für den Unterricht nicht in Betracht. Dies änderte, als die elektronischen Kleinrechner zu immer günstigeren Preisen auf den Markt kamen. Damit konnte auch die numerische Behandlung von Differentialgleichungen in den Unterricht eingebaut werden.

Die Potentialgleichung von Laplace

$$(8)\quad \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0$$

wird nun nicht mehr graphisch gelöst, sondern kann numerisch besser angenähert werden, indem man anstelle der Differentialquotienten finite Differenzen einführt [2]. Dabei geht das Verfahren der sogenannten finiten Differenzen davon aus, dass das Lösungsgebiet durch einen orthogonalen Raster diskretisiert werden kann. Ein Strömungsfeld wird also in ein rechtwinkliges Netz mit den Maschenweiten (Δx, Δz) eingeteilt (Bild 3).

Der im Punkt 0 bekannte Funktionswert von h wird in den Nachbarpunkten 1, 2, 3 und 4 durch Taylorsche Reihen angenähert (Bild 4).

Es gilt dann

$$(15)\quad h_1 = h_0 + \Delta x \cdot \left(\frac{dh}{dx}\right)_0 + \frac{(\Delta x)^2}{2!} \cdot \left(\frac{d^2h}{dx^2}\right)_0 + \left(\frac{\Delta x}{3!}\right)^2 \cdot \left(\frac{d^3h}{dx^3}\right)_0 + \ldots$$

$$(16)\quad h_3 = h_0 - \Delta x \cdot \left(\frac{dh}{dx}\right)_0 + \frac{(\Delta x)^2}{2!} \cdot \left(\frac{d^2h}{dx^2}\right)_0 - \left(\frac{\Delta x}{3!}\right)^2 \cdot \left(\frac{d^3h}{dx^3}\right)_0 + \ldots$$

Subtrahiert man Gleichung (16) von Gleichung (15), so erhält man

$$(17)\quad \left(\frac{dh}{dx}\right)_0 = \frac{1}{2\Delta x}(h_1 - h_3) - \frac{(\Delta x)^3}{3!} \cdot \left(\frac{d^3h}{dx^3}\right)_0$$

Vernachlässigt man $(\Delta x)^2$ mit $n \geqq 2$, so ergibt sich

$$(18)\quad \left(\frac{dh}{dx}\right)_0 = \frac{1}{2\Delta x}(h_1 - h_3)$$

Die Summe der Gleichungen (15) und (16) ist

$$(19)\quad \left(\frac{d^2h}{dx^2}\right)_0 = \frac{1}{(\Delta x)^2}(h_1 + h_3 - 2\,h_0)$$

Stellt man die Gleichungen für eine in der x-z-Ebene variable Funktion auf, so erhält man

$$(20)\quad \left(\frac{\partial h}{\partial x}\right)_0 = \frac{1}{2\Delta x}(h_1 - h_3)$$

$$(21)\quad \left(\frac{\partial h}{\partial z}\right)_0 = \frac{1}{2\Delta z}(h_2 - h_4)$$

$$(22)\quad \left(\frac{\partial^2 h}{\partial x^2}\right)_0 = \frac{1}{(\Delta x)^2}(h_1 + h_3 - 2\,h_0)$$

$$(23)\quad \left(\frac{\partial^2 h}{\partial z^2}\right)_0 = \frac{1}{(\Delta z)^2}(h_2 + h_4 - 2\,h_0)$$

Die Gleichungen (22) und (23) kann man nun in die Laplacesche Potentialgleichung einführen, die dann lautet:

$$(24)\quad \frac{1}{(\Delta x)^2}(h_1 + h_3 - 2\,h_0) + \frac{1}{(\Delta z)^2}(h_2 + h_4 - 2\,h_0) = 0$$

Wählt man einen quadratischen Raster für das Strömungsfeld, so vereinfacht sich die linearisierte Potentialgleichung für innere Punkte des Rasters auf

$$(25)\quad 4\,h_0 - h_1 - h_2 - h_3 - h_4 = 0$$

An den Rändern des Strömungsnetzes werden die Kontinuitätsbedingungen mit Hilfe des Gesetzes von Darcy entsprechend von Geometrie und Durchlässigkeit geändert (Bild 5). Für einen Randpunkt am untern undurchlässigen Rand ändert sich die Kontinuitätsbedingung beispielsweise so:

Nach Darcy (1) ist $v = k \cdot J$, also

$$(26)\quad q = v \cdot A = k \cdot J \cdot A$$

Stellt man für das Element die Bilanz auf, so lautet diese

$$(27)\quad q_{3 \to 0} = q_{0 \to 2} + q_{0 \to 1}$$

$$(28)\quad q_{3 \to 0} = k \cdot \frac{h_0 - h_3}{\Delta x} \cdot \frac{\Delta z}{2}$$

$$(29)\quad q_{0 \to 1} = k \cdot \frac{(h_1 - h_0)}{\Delta x} \cdot \frac{\Delta z}{2}$$

$$(30)\quad q_{0 \to 2} = k \cdot \frac{(h_2 - h_0)}{\Delta z} \cdot \Delta x$$

Setzt man noch $\Delta x = \Delta z$, so erhält man

$$(31)\quad 4\,h_0 - h_1 - 2\,h_2 - h_3 = 0$$

Zur numerischen Lösung des Problems geht man nun so vor, dass man wie vorstehend beschrieben eine angenäherte graphische Lösung in das Rasternetz legt. Dann schätzt man die Druckhöhe aufgrund der graphischen Lösung in den einzelnen Rasterpunkten. Diese ersten Werte werden in einem Relaxationsverfahren mit der linearisierten Potentialgleichung (25) solange variiert, bis die gewünschte Genauigkeit erreicht wird. Entsprechend der Punktlage wird beim Ausgleich die linearisierte Potentialgleichung für einen mittleren oder einen Randpunkt verwendet.

Künftige Entwicklung

Für die klassischen Ingenieurprobleme im Zusammenhang mit Sickerströmungen genügten die oben angegebenen Methoden. Sickerströmungen durch Dämme, Sickerströmungen gegen Baugruben oder gegen unterirdische Hohlräume können mit der graphischen Methode, allenfalls numerisch verfeinert, ingenieurmässig genügend genau erfasst werden. Sind die Strömungsnetze einmal vorhanden, so können die technischen Problemstellungen wie Sickerwassermenge, Sickerströmungsdruck, Spitzen- und Austrittsgradienten bzw. Grundbruchgefahr, Auftrieb etc. bearbeitet werden.

Die Problemstellungen im Zusammenhang mit Sickerströmungen haben sich im Laufe der Jahre geändert. Heute sind es vor allem Fragen des Grundwasserhaushaltes, die gelöst werden müssen, die zwar jetzt noch auf der Forschungsebene behandelt werden, die aber in wenigen Jahren zu den Alltagsaufgaben des Ingenieurbüros gehören werden. Vielerorts in unserem Lande hat die Nutzung der erstklassigen Grundwässer - also sauerstoffreich, eisen- und manganarm, ohne weitere Aufbereitung als Trinkwasser konsumierbar - die Grenze der Grundwasserneubildung erreicht. Darüber hinaus wird die thermische Kapazität des Grundwassers genutzt, im Sommer zur Kühlung, im Winter zur Heizung. Das heute sich stellende Ingenieurproblem besteht darin, ein Grundwasservorkommen optimal zu bewirtschaften, sowohl von der Grundwassermenge wie von deren thermischer Kapazität her.

Das Bewirtschaftungsmodell in einem unserer glazial geprägten Täler wird also einen Grundwasserleiter erfassen müssen, der z.B. so beschaffen sein kann:

Oberhalb eines infolge einer persistierenden glazialzeitlichen Eisrandlage entstandenen Moränenkranzes liegt ein See. Am talseitigen Fuss des Moränenkranzes schliessen die fluvioglazialen Schotter an, die mit zunehmendem Abstand feinkörniger und damit weniger durchlässig werden. Der den See entwässernde Fluss infiltriert streckenweise in die fluvioglazialen Schotter, streckenweise entwässert er sie. Talabwärts staut der Moränenkranz einer früheren persistierenden Eisrandlage einen weiteren See. Der obere See gibt Grundwasser unter der Moräne hindurch in die fluvioglazialen Schotter ab, der untere nimmt Grundwasser aus dem Talboden auf. Zusätzlich infiltrieren die Bäche der Talränder sowie die Niederschläge auf dem Talboden. Ein System von Grundwasserfassungen entnimmt allenthalben Wasser.

Ein solches Modell wird mit der folgenden Differentialgleichung beschrieben [5]

$$(32)\quad \frac{\partial}{\partial x}\left(T_{xx}\cdot\frac{\partial h}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(T_{yy}\cdot\frac{\partial h}{\partial y}\right)= S\cdot\frac{\partial h}{\partial t}+Q$$

Darin bedeuten

$T = k\ (h - a)$ = Transmissivität
Q = flächenhafter vertikaler Zufluss
S = entwässerbares Porenvolumen
a = Höhe der undurchlässigen Schicht
k, h = wie oben
x, y = Koordinaten der Horizontalebene
t = Zeit

Für die numerische Lösung der Differentialgleichung in einem geometrisch-hydraulisch so stark wechselnden Gebiet eignet sich die Methode der finiten Differenzen nicht mehr. Es existieren hiefür Näherungslösungen, die mit der Finite-Element-Methode arbeiten. Die Funktionsansätze werden nur noch über Teilbereiche, die finiten Elemente, definiert. Die Approximationsfunktion beschreibt den tatsächlichen Verlauf des Grundwasserspiegels, der eine beliebig gekrümmte Fläche sein kann, in einem Teilbereich, z.B. in einem Dreieck oder in einem Viereck mit einer beliebig im Raum liegenden Ebene. Jede Ecke oder jeder Mittelpunkt der Elementseiten, also 6 oder 8 pro Element, stellen eine unbekannte Variable dar, die mit dem Lösungsalgorithmus berechnet werden kann. Die exakte Lösung der Differentialgleichung - sofern sie möglich wäre - müsste die Wasserspiegellage in einem Gebiet als eine gekrümmte Fläche darstellen, die Lösungsmethode mittels der finiten Elemente liefert eine aus vielen ebenen Dreiecken oder Vierecken zusammengesetzte polyedrische Fläche, wobei die Polygone alle an den Ecken zusammenhängen.

Nachdem dieses ursprünglich aus der Elastostatik stammende Verfahren in verschiedenen problemorientierten Programmsprachen verwendet wird (Bodenmechanik, Felsmechanik, Baustatik), wird es zu einer Aufgabe für die Ingenieurschule HTL, dem Studenten die Grundlagen der Finite-Element-Methode nahezubringen. Dies wird eine vermehrte Ausrichtung des mathematischen Unterrichtes z.B. auf Matrizenrechnung bedingen.

Noch schwieriger wird es, wenn man die Wärmebewirtschaftung des Grundwassers ins Auge fasst. Über einen Wärmepumpenkreislauf kann im Winter dem Grundwasser Wärme entzogen werden. Das abgekühlte Wasser wird in einem Versickerungsbrunnen in den Grundwasserleiter zurückgegeben; im Sommer wird das kühle Grundwasser benutzt, um die bei Klimatisierung anfallende Wärme abzuführen; wärmeres Wasser wird dann in den Grundwasserleiter reinfiltriert.

Pelka gibt für das Zwei-Brunnen-Speichersystem zur Wärmespeicherung in oberflächennahen Grundwässern folgende Differentialgleichung an [6]:

(33)

$$\frac{\partial T}{\partial t}(\varrho_B\cdot c_B)+\frac{\partial}{\partial x_i}(\varrho_W\cdot c_W\cdot v_i\cdot T)- -\frac{\partial}{\partial x_i}\left(D_{ij}\cdot\frac{\partial T}{\partial x_j}\right)=0$$

Dabei sind

T = Temperatur
ϱ = Dichte
c = spezifische Wärmekapazität
D = Tensor der effektiven thermischen Dispersion
i, j, k = Laufindizes
B, W = Indizes für Boden bzw. Wasser

Dabei beschreibt

$$\frac{\partial T}{\partial t}(\varrho_B\cdot c_B)$$

die *Wärme*, die in einem Kontrollelement aufgrund der zeitlichen Temperaturänderung *gespeichert* oder *entnommen* wird.

Der Ausdruck

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\varrho_W\cdot c_W\cdot v_i\cdot T)$$

enthält den *konvektiven Wärmetransport* in der Grundwasserströmung. Der dritte Ausdruck

$$\frac{\partial}{\partial x_i}\left(D_{ij}\cdot\frac{\partial T}{\partial x_j}\right)$$

beschreibt den *Wärmeleitungsanteil* des Wärmetransports.

Diese komplizierte Differentialgleichung kann für das praktische Ingenieurproblem herangezogen werden, wieweit ein Entnahmebrunnen und ein Versickerungsbrunnen voneinander entfernt sein müssen, damit sie sich gegenseitig nicht beeinflussen.

In der Literatur [7] wird z.B. die «breakthrough-time» - also die *Zeit*, die eine vom Versickerungsbrunnen ausgehende Wärme- oder Kältefront braucht, um den Entnahmebrunnen zu erreichen und damit zu stören - mit

$$(34)\quad t_B = \left(\frac{D}{v}\right) \cdot \left(\frac{V_A}{V_T}\right)\left[1 + \frac{A}{\sqrt{1+4A}} \cdot \ln\left(\frac{1-\sqrt{1+4A}}{1+\sqrt{1+4A}}\right)^2\right]$$

$$(35)\quad A = \frac{Q}{2\pi n \cdot H \cdot D \cdot v}$$

$$(36)\quad \frac{V_A}{V_T} = \frac{(1-n) \cdot \varrho_B \cdot c_B + n \cdot \varrho_W \cdot c_W}{n \cdot \varrho_W \cdot c_W}$$

angegeben. Dies gilt für $v > 0$, wobei v die Grundwassergeschwindigkeit in Richtung Versickerungsbrunnen-Entnahmebrunnen ist, V_A Volumen des Bodens um den Versickerungsbrunnen, worin das Wasser ausgetauscht wurde, V_T das entsprechende Volumen, worin die Temperatur geändert wurde. D ist gleich dem Abstand Entnahmebrunnen-Versickerungsbrunnen, n gleich der Porosität, H gleich der Grundwasserleitermächtigkeit, Q ist die injizierte Wassermenge pro Zeiteinheit.

Wenn t_B länger als die Sommersaison (Kühlung) oder die Wintersaison (Heizung) gewählt wird, so beeinflussen sich die Brunnen nicht.

Es stellt sich hier das Problem, das wir so oft antreffen, dass für einen komplizierten physikalischen Zusammenhang, der durch entsprechende Differentialgleichungen beschrieben wird, handliche Lösungsformeln existieren, die der Student mit seinen mathematischen Voraussetzungen nicht zu kontrollieren imstande ist. Wie weit dürfen wir ihn mit der bequemen Seilbahn auf einen Gipfel führen, dessen Normalroute er zu Fuss zu besteigen nicht imstande ist?

Grundsätzliches zum Lehren und Lernen an der Ingenieurschule HTL

Am Anfang der europäischen Erwachsenenbildung steht jener der Schule Platons benachbarte *Hain des Akademos* [8, 9]. Die in diesem Ambiente gepflegte Unterrichtsmethode zeichnete sich einmal dadurch aus - wenn man an die grossen platonischen Dialoge denkt -, dass die Studenten unter sich einen beträchtlichen intellektuellen Niveauunterschied aufwiesen, dass aber der «Dumme» nicht in einer raschen Selektion eliminiert wurde. Ein zweites Merkmal war, dass der Lehrer keinen Umweg scheute, um den Studenten zum Ziel - der Erkenntnis über den Lehrgegenstand - zu bringen. Als wichtigste Eigenart kann aber die Methode des Gesprächs des Lehrers mit wenigen Studenten genannt werden.

Mit «dem Dummen» meinen wir nicht die thrakische Magd, die in ein Gelächter ausbricht, wie sie den philosophischen Himmelsbetrachter in einen Brunnen stürzen sieht. Aber es beeindruckt uns, dass Sokrates seine Lehrgespräche nicht nur mit dem formal bestechenden Nihilisten *Protagoras* und mit dem durch Vielwisserei verblüffenden *Hippias* führt. Ein ganzer Dialog ist dem langsam und zähflüssig denkenden *Kriton* gewidmet, der über weite Strecken nur mit «ja» oder «nein», oder «so ist es» antworten kann; nicht nur das, mit Kriton bespricht Sokrates die wesentlichen Dinge vom Tod und vom Leben, bevor er den Schierlingsbecher nimmt. Hier wird eine Eigenart platonischen Denkens sichtbar, nämlich dass am wenig begabten Kriton mit seinen einsilbigen Ja-Nein-Antworten die schöpferische Fähigkeit des Lehrers erst sich entzündet. Die Schwerfälligkeit des Schülers wird zum Katalysator, an dem sich die glasklaren Ausführungen des Lehrers entwickeln.

Der zweite der oben erwähnten Punkte betrifft die Effizienz dieser Lehrmethode. In den Dialogen wird immer wieder klar, dass nicht das Ziel, sondern der *Weg* das Wichtige ist. Die Frage ist natürlich zu stellen, ob man bei der heutigen Wissensmenge noch Zeit für so aufwendige Lehrspiele hat.

Nun ist allerdings die Wissensmenge so angeschwollen, dass von einer saubern Bewältigung schon gar nicht mehr gesprochen werden kann. Im Gegenteil: Der Ingenieur HTL - der Hochschulingenieur nicht minder - wird in seiner spätern Praxis noch und noch Daten übernehmen müssen: Materialkennwerte, statistische Werte, Zahlen aus Rechnern und Resultate von problemorientierten Programmsprachen, deren Messung zu repetieren oder deren Mathematik nachzuvollziehen ihm gar nicht möglich ist.

Dies kann schwerwiegende Konsequenzen haben: Man denke z.B. daran, dass die Mehrzahl von Planern die Zahlen der Planungsziele Z_1 und Z_2 bedenkenlos übernommen hat, die zur bekannten Überkapazität unserer Schulen, Spitäler etc. geführt haben.

Zum Problem, Quantitäten richtig zu beurteilen, kommt aber ein noch wichtigeres hinzu: Qualitäten zu erfassen, nämlich in der Wissensschwemme das Wesentliche nicht zu übersehen. Dazu ein zweites Beispiel: Ein bedeutender Thermodynamiker an der ETH hatte bereits in den 50er Jahren die Studenten darauf hingewiesen, dass beim damaligen Konsum wenige Generationen die Erdölvorräte der Menschheit verbrauchen würden, zu deren Bildung Jahrmillionen erforderlich gewesen waren. Obwohl also jeder Bauingenieur in der Physikvorlesung die Differentialgleichung der Absorption beim Durchgang von Wärme, Licht etc. durch eine Wand vorgeführt bekommen hatte, vernachlässigten viele Jahrgänge von Ingenieuren das Energieproblem der Gebäudehülle, so dass der grössere Teil des vor 1973 erstellten schweizerischen Hochbauvolumens wärmetechnisch falsch ausgelegt ist.

Die beiden Beispiele zeigen, dass eines der wichtigsten Ausbildungsziele das Vermitteln der Fähigkeit sein muss, mit einfachen Rechenmethoden die Plausibilität von zu übernehmenden Zahlen überprüfen zu können, die Resultatmengen, die aus den modernen Rechnern herausfluten, kritisch sichten zu können, überhaupt: *kritisch denken* zu können.

Auf den Unterricht im Fache *Grundbau* bezogen wird bei einem komplizierten Strömungsproblem die Bilanz von ein- und ausströmendem Wasser immer noch aufgehen müssen - und die raffinierteste erdbaumechanische Berechnung wird am Schluss Gleichgewicht zwischen Lasten und Sohlpressungen, zwischen actio und reactio zeigen müssen. Unterrichtsziel im Fache Grundbau bleibt damit, auf Kosten der Vollständigkeit und auf Kosten eines sklavischen «Auf-dem-letzten- Stande-des-Wissens-sein-Wollens» die Fähigkeit zu vermitteln, selbständig ein Grundbauproblem qualitativ analysieren zu können und mit einfachen vernünftigen Rechenmethoden die wichtigsten für die Konstruktion erforderlichen Grössen bestimmen zu können.

Ein kulturstratigraphisches Leitfossil unserer Zeit dürfte wohl die *Photokopie* sein, und es wird eines der Hauptanliegen eines Dozenten an einer Ingenieurschule sein, den Studenten dahingehend zu erziehen, dass das, was schwarz auf weiss auf einem A4 steht, nicht getrost nach Hause getragen werden kann. *Wagners Zeiten sind vorbei.*

Die Ingenieurschulen HTL gehören zu den wenigen Schulen des tertiären Bildungsbereiches, in denen wenigstens die dritte platonische Randbedingung noch erfüllt ist: Lehren und lernen geschieht zwischen einem Lehrer und vergleichsweise wenigen Studenten (ca. 10–36). Zudem steht der Student nicht in einem Heer von seinesgleichen einer grösseren Gruppe von Spezialisten gegenüber. An der Ingenieurschule HTL hat eine kleine Gruppe von Studenten einige wenige Generalisten als Lehrer vor sich, hat doch der Professor an der Ingenieurschule HTL meist über einen Bereich zu referieren, der an der Hochschule von mehreren Instituten betreut wird.

Die Unmöglichkeit, Spezialist werden zu können, und der Zwang, einen nur teilweise in die Tiefe gehenden Überblick über ein weites Fächerspektrum immer wieder neu erarbeiten zu müssen, können den Bauingenieur als Lehrer an der Ingenieurschule HTL dazu führen, Bauen als Aufgabe in einem grössern Zusammenhang zu sehen: das Zivilisatorische als einen Bereich der Kultur. Bedeutet doch das Wort τέχνη (techne) nicht nur Handwerk, sondern auch Kunst [10], etymologisch zusammenhängend mit τίκτω, τεκεῖν (tikto, tekein), was sowohl zeugen wie gebären bedeutet. Im Studenten sowohl die Freude an der Bautechnik zu wecken, als auch ihm das Bewusstsein mitzugeben, dass Kultur von colere, d.h. *pflegen* kommt – das ist Auftrag des Lehrers.

Literatur

[1] *Casagrande, A.*: Literature Information Service – A Search for New Ways. Montreal, 1965

[2] *Bölling, W.H.*: Sickerströmungen und Spannungen in Böden. Wien, 1972

[3] *Cedergen, H.R.*: Seepage, Drainage & Flownets. New York, 1977

[4] *Terzaghi/Peck*: Bodenmechanik in der Baupraxis. Berlin, 1961

[5] *Schommer/Trösch/Gerber*: «Vergleich von elektrischen und numerischen Verfahren zur Simulation von Grundwasserströmungen mit Feldmessungen». Mitt. VAW Nr. 9, Zürich, 1973

[6] *Pelka, W.*: «Zwei-Brunnen-Speichersysteme zur Wärmespeicherung in oberflächennahen Grundwasserleitern». Mitt. Inst. für Wasserbau und Wasserwirtschaft. TH Aachen 1981

[7] *Calvin G. Clyde, Govindachari V. Madabhushi*: «Spacing of Wells for Heat Pumps». Journal of Water Resources Planning and Management. Vol. 109, No. 3, July 1983

[8] *Piper, J.*: Was heisst akademisch? München, 1952

[9] *Platon*: Sämtliche Werke. Ausgabe Lambert Schneider, Heidelberg

[10] *Pape, W.*: Handwörterbuch der griechischen Sprache. Braunschweig 1843

Adresse des Verfassers: Prof. *R. Schmidt* dipl. Bau-Ing./dipl. Ing.-Geol. ETH, Vorsteher der Abt. Tiefbautechnik (Bauingenieurwesen) am Zentralschweizerischen Technikum Luzern (Ingenieurschule HTL), Technikumsstrasse, 6048 Horw.

Zur Ästhetik von Talsperren

Von Harald Kreuzer, North Vancouver

Talsperren wirken monumental, allein schon in ihren Dimensionen. Als reine Funktionsbauten, bei welchen die Materialwahl und damit der Talsperrentyp aus wirtschaftlichen Gründen meist vorausbestimmt sind, lassen sie der ästhetischen Gestaltung wenig massgebenden Spielraum.

Anhand von Beispielen lassen sich jedoch die ästhetisch wirksamen Elemente klar aufzeigen. Dominierend ist die Gliederung der sichtbaren Aussenfläche sowohl beim Angleichen an die natürliche Umgebung als auch bei der Ausbildung als Kontrastelement. Bei so grossen Dimensionen ist die Formensprache der Architektur nicht im gewohnten Sinn anwendbar. Besondere Beachtung verlangt die ästhetische Gestaltung der heiklen Übergänge zur Umgebung und der horizontalen obern Abschlusslinie.

Talsperren gehören zu den grössten Bauwerken. Der grösste Damm, *Tarbela* in Pakistan, mit einem Volumen von 120 Mio. Kubikmeter fasst 130mal die *Cheopspyramide* oder ebenso oft eines der höchsten Gebäude der Welt, den *Sears-Tower* in *Chicago*. Auch in Grand-Dixence, der höchsten Staumauer, hat die Cheopspyramide und der Sears-Tower noch etwa sechsmal Platz.

Talsperren sind monumental. Sie werden vom Betrachter meist bewusst erlebt, während den Bauten unserer täglichen Umgebung oft wenig Aufmerksamkeit geschenkt wird. Trotzdem gibt es nicht so etwas wie eine Talsperrenbaukunst. Talsperren verändern Lebensräume, sind Ziele des Massentourismus und Aushängeschild fortschrittsgläubiger Politiker, aber alle Kriterien ihres Entstehens entbehren der baukünstlerischen Gestaltung. Im Vergleich zum Grossteil jeglicher Bautätigkeit ist diese Abstinenz an ästhetischen Gestaltungsmöglichkeiten bei Talsperren einmalig, obwohl ihre Dimensionen visuell so aufdringlich sind. War man z. B. beim Bau des *Opernhauses von Sydney* bereit, der Ästhetik gegenüber einem nüchternen Funktionalismus eine beträchtliche Summe an Mehrkosten zuzugestehen, so ist das im Talsperrenbau nicht denkbar. Dieser ketzerische Vergleich soll keineswegs das eine oder andere Vorgehen verdammen, sondern lediglich beispielhaft zwei Extreme aufzeigen.

Einordnung in bestehende Formtheorien

Talsperren sind reiner *Funktionsbau*. Das Architekturdogma, wonach die Form der Funktion folgt, gilt für sie in erhöhtem Masse. Talsperren lassen sich nur beschränkt mit den in der Baukunst üblichen drei Kriterien der funktionellen, technischen und ästhetischen Aspekte beurteilen.

Das *Funktionelle* steht im Vordergrund mit der Aufgabe, den Wasserdruck zu beherrschen.

Dem *Technischen*, der Wahl der Baumaterialien und damit des Talsperrentyps, liegt eine etablierte Beispielsammlung zugrunde, deren Freiheit wenig Spielraum für die Formenwahl lässt. *Dämme* sind im Rahmen der ästhetischen Betrachtungsweise als Einheit anzusehen. Unter den Staumauern hat man die Wahl zwischen *Gewichtsmauer, Gewölbemauer* und *aufgelösten Mauerformen*. Abarten, wie sie vor allem durch französische Ingenieure erdacht wurden, gehören zu den – wenn auch oft sehr reizvollen – Ausnahmen. Diese Formenwahl wird dann noch in den Rahmen eines strengen Kostendenkens gezwängt.

Das *Ästhetische* schliesslich kann im Talsperrenbau nur als *Nebenprodukt* der beiden erstgenannten Kriterien in Erscheinung treten, ist also die notge-

Bild 1. Zielvolumen der Bautätigkeit in Würfelform. Jede Achse entspricht einem Gestaltungskriterium: dem Funktionellen (Z), dem Technischen (X) und dem Ästhetischen (Y)