

Institut für Hydrologie

Albert-Ludwigs-Universität Freiburg i. Br.

Thomas Vettori

**Möglichkeiten der Endoskopie zur
Parameterbestimmung für die Modellierung
von Makroporenfluß**

Diplomarbeit unter der Leitung von
Prof. Dr. Ch. Leibundgut

Freiburg i. Br., April 1998

Institut für Hydrologie

Albert-Ludwigs-Universität Freiburg i. Br.

Thomas Vettori

**Möglichkeiten der Endoskopie zur
Parameterbestimmung für die Modellierung
von Makroporenfluß**

Referent: Prof. Dr. Ch. Leibundgut

Koreferent: PD Dr. S. Demuth

Diplomarbeit unter der Leitung von
Prof. Dr. Ch. Leibundgut

Freiburg i. Br., April 1998

Vorwort

Wenn Schadstoffe in den Boden gelangen und unser Trinkwasser gefährden oder Hochwässer ganze Stadtteile zu überfluten drohen, werden die Diskussionen über Vorhersage- und Vermeidungsmöglichkeiten solcher Ereignisse laut. Da die Prozesse der Abflußbildung, also die Transformation des Niederschlages auf die Fläche und dessen Weiterleitung ins Grundwasser und zum Fließgerinne noch nicht allgemein gültig geklärt sind, bleiben diesbezüglich noch viele Fragen offen. Ein Teil dieser Fragen betrifft das Fließverhalten in den Makroporen der Böden.

Ich hoffe, mit dieser Arbeit einen kleinen Beitrag zur Beantwortung dieser Fragen leisten zu können.

Zunächst möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr. Christian Leibundgut für die Möglichkeit bedanken, dieses interessante Thema bearbeiten zu dürfen.

Herrn PD Dr. S. Demuth danke ich für die Übernahme des Koreferates.

Einen besonders großen Anteil am Gelingen dieser Arbeit hat die Firma *Storz - Endoskopie* in Tuttlingen, die mir für diese Diplomarbeit ein hochwertiges Endoskop zur Verfügung stellte. Sie erklärte sich bereit, die dabei entstandenen, erheblichen Kosten selbst zu tragen. Mein besonderer Dank gilt dabei den Mitarbeitern Herrn Dr. Rehling und Herrn Baintner, die immer bereit waren, sich für die Beantwortung meiner Fragen Zeit zu nehmen. Ohne ihr großes Engagement wäre die Durchführung dieser Arbeit nicht möglich gewesen.

Für die Betreuung im Rahmen dieser Arbeit möchte ich mich bei Herrn Günter Gässler bedanken, der mich zu jeder Zeit mit guten Ideen und wertvollen Anregungen unterstützt hat.

Besonderer Dank gebührt meiner Lebensgefährtin Manuela Hörenberg und meinen Kindern Raphael und Carina, die mir während meines Studiums eine angenehme Umgebung geboten haben und so ihren Teil zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Meinem Vater und meiner kürzlich verstorbenen Mutter gebührt herzlichster Dank für ihre großzügige Unterstützung während meines Studiums. Ihnen möchte ich diese Arbeit widmen.

I Inhaltsverzeichnis

- II Verzeichnis der Abbildungen
- III Verzeichnis der Tabellen
- IV Symbolverzeichnis
- V Abkürzungen

Zusammenfassung.....	1
Summary.....	3
1 Einleitung.....	5
1.1 Einführung.....	5
1.2 Problemstellung	7
1.3 Zielsetzung und Vorgehensweise	8
2 Theoretische Grundlagen.....	10
2.1 Makroporen.....	10
2.1.1 Was sind Makroporen?	10
2.1.2 Wie entstehen Makroporen?	13
2.2 Markierungstechnik	17
2.3 Lichtleitertechnik	21
2.3.1 Entwicklung der Lichtleitertechnik	21
2.3.2 Aufbau eines Fluorometers	21
2.3.3 Aufbau von Lichtleiterfluorometern	23
2.3.4 Meßelektronik für Lichtleiterfluorometer	27
3 Endoskopie.....	28

3.1	Was ist Endoskopie?.....	28
3.2	Beschreibung eines flexiblen Endoskopes	29
3.3	Varianten, Funktionen und Erweiterungen flexibler Endoskope	32
3.3.1	Endoskoplänge	32
3.3.2	Endoskopdurchmesser	33
3.3.3	Visuelle Beobachtung	33
3.3.4	Arbeitskanal	33
3.3.5	In-situ-Messung von Fluoreszenztracer-Konzentrationen.....	34
3.4	Fazit	37
4	Modellierung von Makroporenfluß	38
4.1	Einfache Modelle.....	38
4.2	Zweidomänenmodelle und Modellsysteme	42
4.3	Fazit	50
5	Schlußfolgerungen	51
6	Literaturverzeichnis	54

II Verzeichnis der Abbildungen

Abb. 1.1	Vorgehensweise und Zielsetzung.....	9
Abb. 2.1	Kapillaritätsgesetz	10
Abb. 2.2	Entstehung von Makroporen	13
Abb. 2.3	Aufbau eines Fluorometers	22
Abb. 2.4	Aufbau eines Faserbündelfluorometers.....	23
Abb. 2.5	Einzelfaserlichtleiter.....	24
Abb. 2.6	Aufbau eines Einzelfaserfluorometers	26
Abb. 3.1	Größenvergleich zwischen Einzelfaserlichtleiter und Endoskopen..	29
Abb. 3.2	Geordnetes Faserbündel.....	30
Abb. 3.3	Schnitt durch Adapter A.....	35
Abb. 3.4	Schnitt durch Adapter B.....	35
Abb. 4.1	Berechnung der Kapillargrößerverteilung im CBM	40
Abb. 4.2	Hierarchie der Eingabedaten im Modellsystem CATFLOW	44

III Verzeichnis der Tabellen

Tab. 2.1 Definitionen von Makroporen mittels Saugspannung und Äquivalentdurchmesser	12
Tab. 2.2 Extinktions- und Emissionswellenlängen fluoreszierender Farbstoffe	18
Tab. 5.1 Makroporenparameter und potentielle Bestimmungs- möglichkeiten mittels Endoskopietechnik	51

IV Symbolverzeichnis

Die Grundeinheiten sind wie folgt abgekürzt: L = Länge, T = Zeit, M = Masse;

Symbol	Einheit	Bedeutung
a_{mak}	[-]	Anpassungsparameter
A	[L ²]	Querschnittsfläche
b	[L]	radialer Einflußbereich der Makropore im Einheitsvolumen
b	[L]	halbe Kluftweite
b_{mak}	[L/T]	maximale Fließgeschwindigkeit in den Makroporen
c	[M/L ³]	Konzentration eines gelösten Stoffes
C	[-]	Wasserkapazität
C_w	[-]	Wasserkapazität
$C_w(\Psi)$	[-]	Wasserkapazitäts-Funktion
d	[L]	Makroporendurchmesser
g	[L/T ²]	Erdbeschleunigung
h	[L]	Höhe
h	[L]	Druckhöhe der Bodenmatrix
h_m	[L]	Druckhöhe in den Makroporen
$h(\theta)$		Matrixpotential/Wassergehalts-Funktion
H	[M/T ² ·L]	hydrostatischer Druck
ΔH	[L]	hydraulischer Druckgradient
I	[-]	Gefälle
I	[M/T ³]	durchgelassene Lichtintensität
I_0	[M/T ³]	eingestrahlte Lichtintensität
I_{abs}	[M/T ³]	absorbierte Lichtintensität
I_F	[M/T ³]	emittierte Lichtintensität
I_F	[M/T ³]	Fluoreszenzintensität
J_w	[L/T]	auf eine Querschnittsfläche bezogener Fluß
k	[L/T]	Durchlässigkeitsbeiwert der Bodenmatrix

k_{sat}	[L/T]	gesättigter Durchlässigkeitsbeiwert
K	[L ²]	hydraulische Leitfähigkeit
K_s	[L/T]	gesättigte Leitfähigkeit
$K(\theta)$		Leitfähigkeit/Wassergehalts-Funktion der Boden-matrix
L	[L]	Bodensäulenlänge
L_c	[L]	Kapillarröhrenlänge
M	[-]	Anzahl der Röhrengößenklassen
n_{eff}	[-]	effektive Porosität, nutzbares Porenvolumen
n_j	[1/L ²]	Anzahl der Kapillarröhren pro Flächeneinheit
n_ϕ	[1/L ²]	Makroporendichte
n_{mak}	[-]	Makroporosität
N_j	[-]	Anzahl der Kapillarröhren
q_a	[M/(T ² ·L)]	atmosphärischer Druck
q_c	[L]	Kapillarspannung
q_{mak}	[L/T]	Fließgeschwindigkeit in den Makroporen
$q_{mak-mik}$	[L/T]	Flußrate aus der Makro- in die Mikroporen
Q	[L ³ /T]	Durchfluß
Q_g	[L ³ /T]	Gesamtdurchfluß
Q_j	[L ³ /T]	Durchfluß durch die j-te Röhre
r	[L]	Radius
R	[L]	Radius
R_j	[L]	Radius der j-ten Röhre
Δs	[L]	diskrete Wirkungslänge für die Saugspannungs-differenz
t	[T]	Zeit
v_f	[L/T]	Filtergeschwindigkeit
v	[L/T]	mittlere Porenwassergeschwindigkeit (= Abstandsgeschwindigkeit)
x	[L]	Schichtdicke bzw. Länge der Meßstrecke
x_e	[L]	charakteristische Entfernung der Wasserbewegung
x_l	[L/T]	Stärke der Makroporenwandung
ε	[-]	Extinktionskoeffizient
θ	[-]	Wassergehalt

θ_{mak}	[-]	Makroporenwassergehalt
θ_s	[-]	Sättigungswassergehalt
ν	[L ² /T]	kinematische Viskosität
ρ_w	[M/L ³]	Dichte des Wassers
σ	[M/T ²]	Oberflächenspannung
τ	[-]	Torsionsfaktor
ϕ	[-]	Quanteneffizienz der Fluoreszenz
φ		Benetzungswinkel
Ψ	[L]	Potential, hydraulisches Potential
$\partial\Psi/\partial s$	[-]	Saugspannungsgradient
Ψ_m	[L]	Matrixpotential
Ψ_z	[L]	Gravitationspotential

Zusammenfassung

Der Einfluß von Mensch, Tier, Pflanze und anderen Faktoren auf die Struktur der Böden bewirkt ein sich ständig änderndes hoch komplexes System von Feststoffen und Poren. Bei der Modellierung der Fließvorgänge in der ungesättigten Zone wird dabei in neueren Modellen versucht zwischen den Fließvorgängen in der Bodenmatrix und Fließvorgängen in bevorzugten Fließwegen wie den Makroporen zu unterscheiden. Bei der Betrachtung solcher Modelle stellt sich heraus, daß die Parameterbestimmung für die Modellierung des Makroporenflusses mit großen Schwierigkeiten verbunden ist. Diese unbekanntes Größen, wie Porendurchmesser oder Fließgeschwindigkeiten in den Poren, werden nicht direkt bestimmt und müssen deshalb aus anderen, teilweise schwer bestimmbar Parametern abgeleitet, aus Geländebeobachtungen und Literaturwerten abgeschätzt oder zur Anpassung der Modelle an die realen Verhältnisse verwendet werden. Die Fragen, die sich bei der Modellierung von Makroporenfluß stellen, können wie folgt zusammengefaßt werden:

- Welche Größe und Form haben die einzelnen Makroporen im System?
- Welche Eigenschaften besitzen die Makroporenwandungen?
- Wie viele Makroporen einer Klasse gibt es im System und wie sind sie verteilt?
- Wie stehen die einzelnen Makroporen miteinander in Verbindung?
- Welchen räumlichen und zeitlichen Veränderungen unterliegt das System?

Es wird theoretisch überprüft, in wie weit die Endoskopietechnik, insbesondere in Verbindung mit tracermethodischen Untersuchungen, Möglichkeiten bietet solche Fragen zu beantworten.

Es konnte gezeigt werden, daß die Endoskopie prinzipiell dazu geeignet ist, um wertvolle Informationen über die Fließvorgänge in Makroporen und über die Interaktionen zwischen Matrix und Makroporen zu liefern. Ein großes Potential an

Möglichkeiten eröffnet die Multifunktionalität der entwickelten Technik. So können prinzipiell mit einem Endoskop von weniger als 3 mm Durchmesser Makroporen dieser Größe und darüber vielseitig untersucht werden. Dabei können visuell Informationen z.B. über Makroporengeometrie und Beschaffenheit der Wandungen gewonnen oder Wassereintritte in Makroporen während Niederschlagsereignissen beobachtet werden. Weiterhin können Flüssigkeiten und Gase in einen Hohlraum im Boden eingebracht oder daraus zu entnommen werden.

Außerdem ist es möglich, mit dieser Technik Fluoreszenztracer-Konzentrationen zu bestimmen. Dazu wurde ein medizinisches Endoskop mit einem Lichtleiterfluorometer kombiniert. Um erste Versuche durchführen zu können, wurden konstruktive Veränderungen am Endoskop vorgenommen. Es wurde diskutiert, wie die entwickelte Technik optimiert werden kann.

Obwohl diese Technik vielversprechende Möglichkeiten zur Parametererhebung bietet, bleiben noch einige Fragen offen. Die Wichtigste ist dabei, ob diese neue Technik beim Einsatz im Labor und im Gelände die gestellten Anforderungen erfüllen kann. Mögliche Lösungen dieser Probleme wurden diskutiert.

Summary

Under the influence of man, animals, plants and other conditions the soil and its structure is constantly altered and results in a complex system of solids and pores. Modelling water flow in the vadose zone is therefore often hampered by the complexity and the unknown characteristics of this domain. Although recent models consider matrix as well as macropore flow, it can be seen that there are great difficulties to determine the necessary parameters, describing macropores. Values like the diameter, extent, depth and the flow velocities of macropores can hardly be derived by direct measurements. Therefore, they are often estimated or taken from literature. The questions arising on the attempt to describe macropores can be summarized as follows:

- What size and shape do macropores have?
- What characteristics do the macropore walls have?
- How many macropores of the same size exist and how are they distributed?
- How are the single macropores connected?
- How do macropores change in space and time?

This study was conducted to evaluate the potential of endoscopical techniques to answer some of these questions.

It can be shown that an endoscope could give valuable informations about macropore geometry and flow characteristics. Due to the multifunctional features of a simple medical endoscope with a diameter of less than 3 mm, macropores of almost the same size or larger can be visually examined. The geometry, condition of the macropore walls and flow in macropores can be visually observed and examined. Further it is possible by mean of a canal running through the endoscope to obtain water samples or to inject fluids into the examined macropore. As another useful feature it was considered to use the endoscope to analyze fluoreszent tracer substances. For preliminary experiments the endoscope was combined with a on-line fluorescence detector, showing first promising results. For this only minor changes in the construction had to be made. Although the technique looks

promising, some questions are still remaining. One of the most important is, if the device is capable of working under laboratory, or even more important, under field conditions. Possible solutions to these problems are discussed.

Keywords:

macropores, endoscopy, modelling, fluorometry

1 Einleitung

1.1 Einführung

Die zunehmende Besorgnis um landwirtschaftlich genutzte Chemikalien und andere Verschmutzungen, die ins Grundwasser gelangen, führten in den letzten Jahren zu immer größerem Interesse an Computermodellen, die den Transport dieser Stoffe beschreiben und vorhersagen können. Auch die extremen Hochwasserereignisse der letzten Jahre verstärkten die Suche nach Modellierungsmethoden, um durch genauere Vorhersagen Schäden vermeiden können.

Der Abflußbildungsprozeß, also die Transformation des Niederschlags auf die Fläche und dessen Weiterleitung zum Fließgerinne nimmt sowohl bei der Schadstoffausbreitung, wie auch bei der Hochwasserentstehung eine zentrale Rolle ein. Von entscheidender Bedeutung sind dabei die Fließvorgänge in der ungesättigten Zone, die maßgeblich von den strukturellen Eigenschaften der Böden abhängen. Die alleinige Betrachtung der Bodenmatrix hat sich bei der Erklärung von Wasserbewegungen in Böden in vielen Fällen als unzureichend erwiesen. Es hat sich gezeigt, daß die Fließvorgänge in Makroporen, wie z.B. Wurm- oder Wurzelröhren, für Wasserbewegungen in der ungesättigten Zone und damit für die gesamte Abflußbildung von entscheidender Bedeutung sein können.

Über den Einfluß solcher Hohlräume auf die Fließbewegungen in Böden schrieben schon in der zweiten Hälfte des letzten Jahrhunderts Autoren wie SCHUMACHER (1864) in seinem Werk *Die Physik des Bodens* oder DARWIN (1881) in seiner Beschreibung über die Lebensweise von Regenwürmern und ihren Einfluß auf Böden, *The Formation of Vegetable Mold*. LAWES et al. (1882) stellten aufgrund von Feldversuchen die Vermutung auf, daß „... es zwei Arten von ausfließendem Wasser im Boden geben muß; es muß aus Regenwasser bestehen, das entweder durch offene Kanäle ... oder aus gesättigtem Boden ausfließt.“

Bei der Modellierung der Wasserbewegungen in der ungesättigten Zone wird besonders seit den letzten zwei Jahrzehnten versucht, Fließvorgänge in Makroporen von denen in der Matrix zu unterscheiden und auch Interaktionsprozesse zwischen diesen zwei Domänen mit einzubeziehen.

1.2 Problemstellung

Eine detailliertere Modellierung von Abflußbildungsprozessen erfordert die Erhebung der dafür notwendigen Parameter. Dies stellt jedoch ein großes Problem dar, weil es zur Zeit in den meisten Fällen nicht möglich ist diese unbekannt GröÙen direkt zu bestimmen.

Prinzipiell eignen sich zur Erforschung von Fließvorgängen tracermethodische Untersuchungen. Besonders der Einsatz von fluoreszierenden Markierungsstoffen in Verbindung mit der Lichtleiterfluorometrie stellt für die Gewinnung dieser Parameter einen vielversprechenden Ansatz dar. Aufgrund der noch unzureichenden MeÙtechnik können aber Tracerdurchgänge und damit Fließgeschwindigkeiten und andere Transportparameter in Makroporen kaum bestimmt werden. Dies trifft sowohl für die Gewinnung von Proben als auch für die in-situ-Messung von Tracerkonzentrationen bei Markierungsversuchen zu.

1.3 Zielsetzung und Vorgehensweise

Im Rahmen dieser Arbeit soll nach Möglichkeiten gesucht werden, Beprobungsmethoden oder in situ Messungen mittels Endoskopiertechnik in der ungesättigten Zone zu verbessern.

Um sich über die Anforderungen klar zu werden, die an eine dafür notwendige Technik gestellt werden, sollen zunächst theoretische Grundlagen über die Domäne der Makroporen erarbeitet und die bisher zur Bestimmung von Tracerkonzentrationen entwickelten Lichtleitertechniken vorgestellt werden.

Es soll weiterhin erarbeitet werden, welche Parameter für die Modellierung von Makroporenfluß verwendet werden und welche Lücken bei der Bestimmung dieser Größen wegen der unzureichenden Meßtechnik bestehen.

Die Endoskopiertechnik soll untersucht werden, ob sie einen Beitrag zur besseren Bestimmbarkeit von Parametern für die Makroporenfluß-Modellierung liefern kann. Abschließend sind notwendige Modifikationen der bestehenden Endoskopiertechnik vorzuschlagen, die als Basis für die Entwicklung eines neuen in-situ-Meßgerätes dienen können.

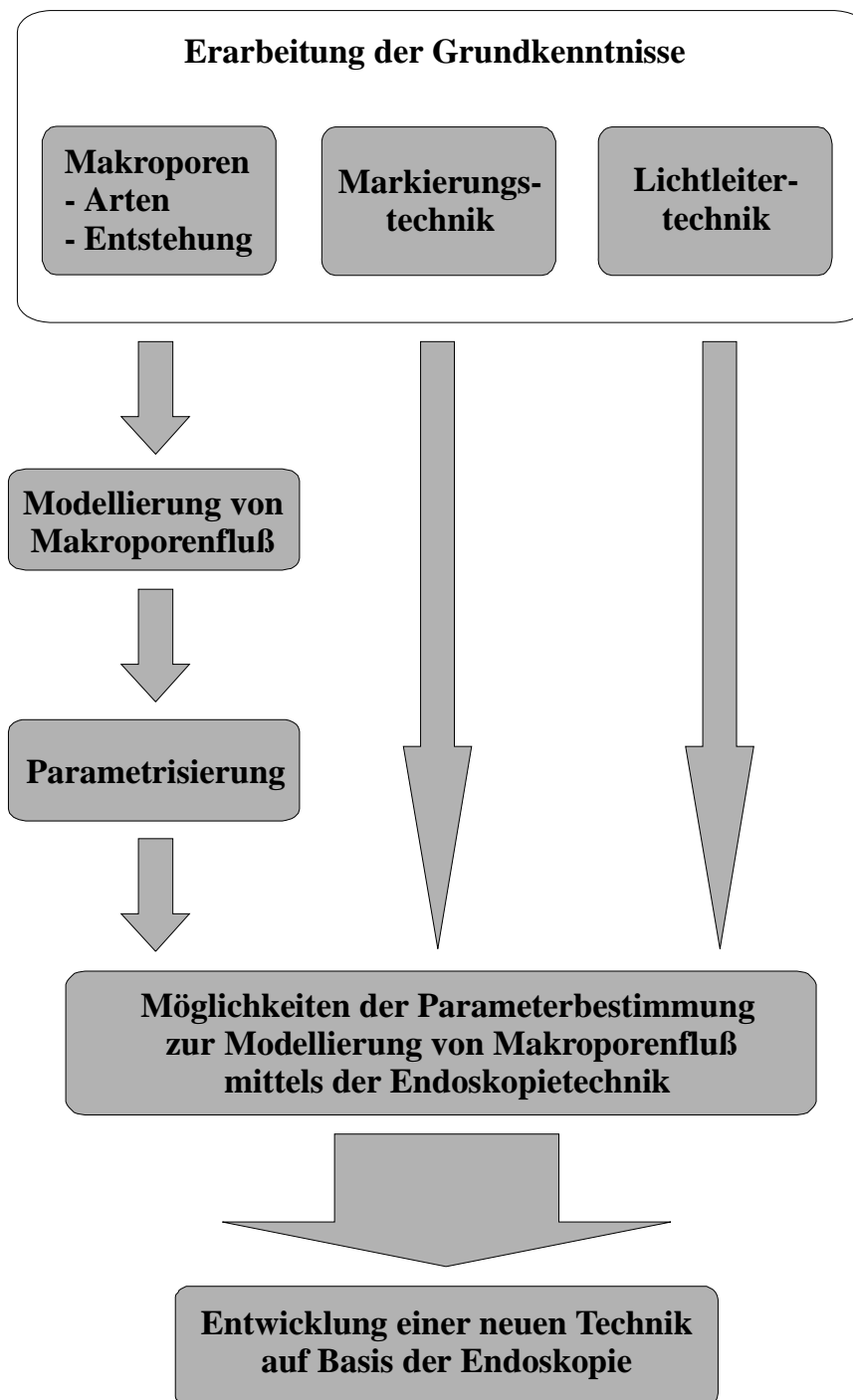


Abb. 1.1: Vorgehensweise und Zielsetzung

2 Theoretische Grundlagen

2.1 Makroporen

2.1.1 Was sind Makroporen?

Fließbewegungen in einem kleinen Hohlraum im Boden sind abhängig von der Größe des Hohlraums und von seiner normalerweise irregulären Geometrie. Die Fließvorgänge in einem Boden werden also von Hohlräumen kleinster Größe kontrolliert. Folglich ist eine komplexe Beziehung zwischen Hohlraumgeometrie und Durchflußcharakteristik zu erwarten (BEVEN & GERMANN, 1982: 1311).

Das vielgestaltige Porensystem der Böden ist mathematisch nicht zu berechnen. Energetisch betrachtet, erfolgt die Bindung des Wassers im Boden nach den Gesetzmäßigkeiten der Kapillarität und Adsorption an festen Grenzflächen. Die Wasserbindung im Boden ist vor allem eine Funktion der Porengröße. Nach dem Kapillaritätsgesetz (Abb. 2.1) kann man den Äquivalentporendurchmesser errechnen und umgekehrt bei gegebenem Durchmesser die Poren verschiedenen Saugspannungen und Funktionsbereichen (z.B. pflanzenverfügbares Wasser oder Dränung) zuordnen.

In einer Kapillare wird Wasser durch Druckdifferenz bis zu einer Höhe gesaugt, in welcher der atmosphärische Druck P_A mit der am Meniskus wirksamen Kapillarspannung (P_C) im Gleichgewicht steht. Die abwärts gerichtete Kraft ist gegeben durch die Höhe (h) und den Querschnitt (πr^2) der Wassersäule, die am Miniskus hängt, multipliziert

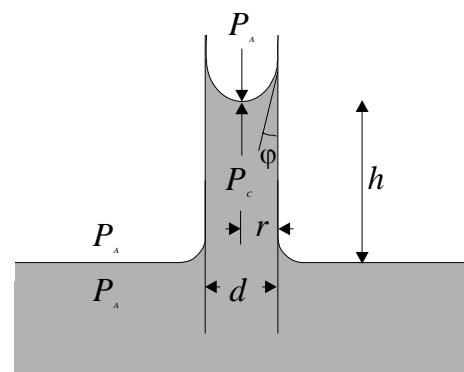


Abb. 2.1: Kapillaritätsgesetz

mit der Dichte (ρ_w) des Wassers und der Erdbeschleunigung (g). Aufwärts gerichtet wirkt die Oberflächenspannung (σ) des Wassers multipliziert mit dem benetzten Umfang ($2\pi r$) und dem Benetzungswinkel (φ).

$$P_A = P_C \quad (2.1)$$

$$h \cdot \pi r^2 \cdot \rho \cdot g = \sigma \cdot 2\pi r \cdot \cos \varphi \quad (2.2)$$

$$h = \frac{0,297}{d} \text{ cm} \quad (\text{für Wasser bei } 20^\circ\text{C}) \quad (2.3)$$

Mit der Steighöhenleichung können nun verschiedene bodenphysikalisch wichtige Aussagen und Messungen gemacht werden. Jedem Porendurchmesser kann damit eine Kapillarspannung zugeordnet werden und bei vorgegebener Wasserspannung können die jeweils mit Wasser gefüllten Poren und ihre Durchmesser ermittelt werden. Wenn eine mit Wasser gesättigte Probe einem Unter- bzw. Überdruck ausgesetzt wird, gibt diese Probe eine bestimmte Wassermenge ab. Aus dem Wasserverlust können die mit den jeweiligen Drücken korrespondierenden Porenanteile in Volumenprozent ermittelt werden. Damit ist die Bindungsintensität des Wassers im Boden als Saugspannung definiert, die bei seiner Entwässerung überwunden werden muß. Die erforderlichen Drücke liegen zwischen 0 und 1,5 MPa (15 bar). Wegen des großen Spannungsbereiches werden zur Kennzeichnung der Wasserspannung pF-Werte als dekadische Logarithmen des jeweiligen Druckes (\log cm Wassersäule (WS)) verwendet (z.B. 10 cm WS = 0,01 bar = 1kPa \Rightarrow pF 1; 100 cm WS = 0,1 bar = 10kPa \Rightarrow pF 2) (KUNTZE, 1994: 165 -168).

Makroporen über die Saugspannung bzw. den Äquivalentdurchmesser zu definieren, ist die am häufigsten angewandte Methode. Dabei wurden unterschiedlich die Grenzwerte von verschiedenen Autoren sehr unterschiedlich festgelegt (Tab. 2.1).

Tab. 2.1: Definitionen von Makroporen mittels Saugspannung und Äquivalentdurchmesser (nach CHEN C. & WAGENET R. J., 1992: 106)

Autor	Saugspannung [kPa]	Äquivalentdurchmesser [µm]
Nelson and Baver (1940)	< 3,0	
Marshall (1959)	< 10,0	> 30
Brewer (1964)		
grobe Makroporen		5000
mittlere Makroporen		2000 - 5000
feine Makroporen		1000 - 5000
sehr feine Makroporen		75 - 1000
McDonald (1967)	< 6,0	
Webster (1974)	< 5,0	
Dullien (1979)	< 0,5 - 1	
Luxmoore (1981)	< 0,3	> 1000
Beven und Germann (1981)	< 0,1	> 3000
Radulovich et al. (1989)	< 5,0	> 200

Die Größe (oder die entsprechende Saugspannung) allein kann jedoch kein ausschlaggebendes Kriterium für die Definition von Makroporen sein.

Oft verwendete Ausdrücke, wie *bevorzugte Fließwege* oder *Makrokanäle* unterstreichen die Bedeutung der Struktur für die Fließdynamik. Deshalb gibt es auch Ansätze, die Makroporen über die Infiltrationsrate (CHEN et al., 1993: 680) oder über die hydraulische Leitfähigkeit (BEVEN & GERMANN, 1982: 1312) des Boden zu klassifizieren. Die Zahlenwerte der jeweiligen Größen, die zur Definition von Makroporen benutzt werden könnten, sind jedoch immer mit den Eigenschaften der umgebenden Matrix verbunden. Deshalb gibt es keine einheitliche Definition von Makroporen, um diese Porenklasse von allen anderen abzugrenzen (CHEN et al., 1993: 680).

Die von BEVEN & GERMANN (1982) für die Fließbewegungen in Makroporen geprägten Begriffe *channeling* und *channeling flow* deuten darauf hin, daß nicht alle großen Hohlräume im Boden Makroporen im Sinne bevorzugten Fließwegen sind. Das Wort Makropore impliziert im weiteren Gebrauch Strukturen, die

Fließbewegungen zulassen, welche mit Fließvorgängen in Röhren vergleichbar sind.

2.1.2 Wie entstehen Makroporen?

Die Entstehung von Makroporen kann unterschiedliche Ursachen haben (Abb. 2.2).

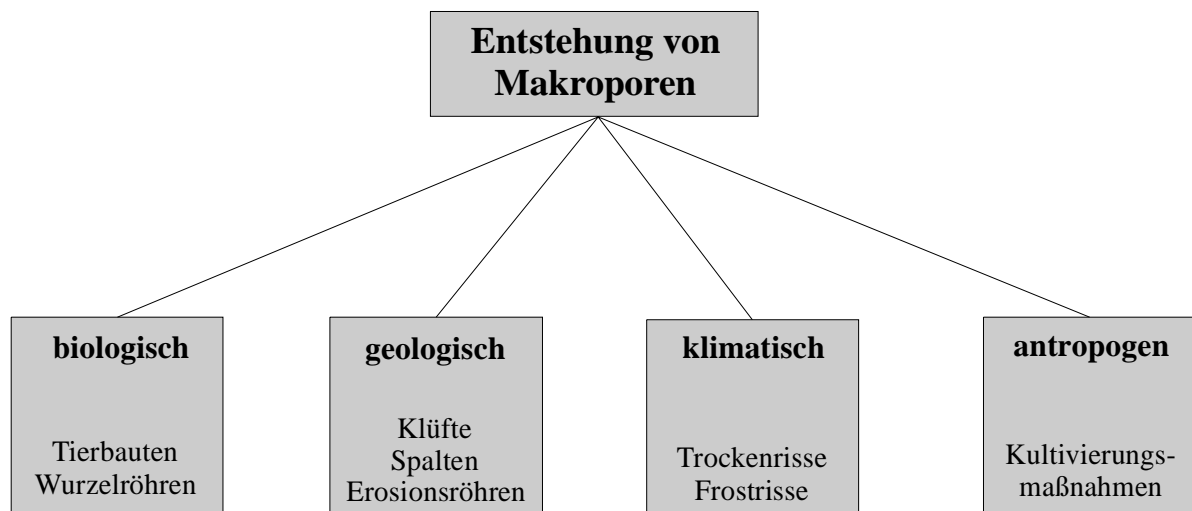


Abb. 2.2: Entstehung von Makroporen

Makroporenarten:

- **Durch die Bodenfauna gebildete Poren:**

Diese Poren sind hauptsächlich röhrenförmig und können Durchmesser von weniger als 1 mm bis mehr als 50 mm aufweisen. Die Röhren mit den größten Durchmessern werden von grabenden Tieren (Mäuse, Maulwürfe) gebildet und

konzentrieren sich hauptsächlich auf den Bereich dicht unter der Geländeoberfläche (BEVEN & GERMANN, 1982: 1312).

Die Wohnröhren der weit verbreiteten Regenwürmer können dagegen je nach Art mehrere Meter tief sein und Durchmesser bis etwa 20 mm erreichen (LAMPARSKI, 1985: 16-96). Regenwurmgänge enden blind und sind durch Schleimabsonderungen abgedichtet. Ihr Einfluß auf die Wasserbewegungen durch verdichtete Horizonte oder Schichten wird als sehr groß angesehen. In Böden mit dichtem Unterboden wird ihre dröhnende Wirkung jedoch meist überschätzt (KUNTZE, 1994: 156). LAMPARSKI (1985) gibt eine ausführliche Übersicht über einige Regenwurmartentypen und deren Bauten.

GREEN und ASKEY (1965) beschreiben die Aktivitäten von Ameisen, die schwammartige Makroporen-Netzwerke von 2 - 50 mm Durchmesser und mit Tiefen von mindestens 1 m bauen. Diese Untersuchungen sind besonders im Zusammenhang mit früheren hydrologischen Arbeiten von CHILD et al. (1957) interessant, in dem die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit von Tonböden in einer Größenordnung angegeben wird, die gewöhnlich mit Kiesschichten in Verbindung gebracht werden.

Feuchtigkeitszustände und pH-Werte des Bodens beeinflussen die Zusammensetzung der Bodenfauna. In stark sauren Böden dominieren eher die Insekten, während Regenwürmer leicht saure bis neutrale Böden bevorzugen. Sie meiden basische Böden fast vollständig (BEVEN & GERMANN, 1982: 1312). Eine kompakte Übersicht über die Aktivitäten von Tieren in Böden gibt HOLE (1981).

- **Durch Pflanzenwurzeln gebildete Poren:**

Die ebenfalls röhrenförmigen Poren dieser Kategorie, können sowohl von lebenden, als auch von zerfallenden Wurzeln herrühren. Neue Wurzeln folgen oft den alten Gängen zerfallender Wurzeln und lassen sich auch deshalb oft nur schwer von einander unterscheiden. Die Rinde von Baumwurzeln widersteht dem Zerfall in vielen Fällen länger als das Xylem (Holzteil). Dadurch entstehen schlauchartige Makroporen, die teilweise von Rinde versiegelt sind. Der dabei

entstehende Hohlraum ist oft lose mit organischem Material gefüllt, das hauptsächlich von der zerfallenden Wurzel selbst stammt. Solche Makroporen können mindestens 35% des Volumens eines Waldbodens ausmachen, nehmen aber erwartungsgemäß mit der Tiefe stark ab. Die Struktur der Makroporensysteme, die von Wurzeln herrühren sind von der Pflanzenart und den Wachstumsbedingungen abhängig. Diese komplexen Strukturen können selbst bei ungesättigten Böden sehr effektiv Wasser durch den Boden leiten (BEASLEY, 1976: 955 - 957).

Durch das Entwurzeln von Bäumen oder durch den Zerfall von Baumstümpfen können Geländemulden entstehen, die wie ein Trichter wirken. Dabei kann Wasser in ein Netz von Makroporen eingespeist werden, das von den zerfallenden Wurzeln gebildet wird.

Ehemalige Graswurzeln können ein System von eher gleich großen Makroporen hervorbringen (BEVEN & GERMANN, 1982: 1313).

- **Risse und Klüfte:**

Diese Art von Makroporen entstehen durch Schrumpfung bei der Austrocknung von Tonböden (SCHACHTSCHABEL et al., 1989: 154 - 156), durch chemische Verwitterung von anstehendem Gestein oder durch häufiges Frieren und Tauen der Böden (HARTGE & HORN, 1991: 229 - 233).

- **Durch Kultivierungstechniken entstehende Poren:**

Vor allem im Rahmen von Dränagemaßnahmen werden *künstliche Makroporen* geschaffen wie z.B. bei der *Maulwurfsdränung*, bei der ein geschoßförmiger, von einer Art Scharpflug gezogener Preßkörper einen Kanal anlegt, der zur Entwässerung dient (HARTGE & HORN, 1991: 250).

- **Natürliche Bodenröhren:**

Bei gut durchlässigen Böden und hohen hydraulischen Gradienten können sich durch Tunnelerosion (SCHACHTSCHABEL et al., 1989: 468) unter der Oberfläche Röhren bilden.

In Festgestein durch Erosion eingeschnittene Rillen und Furchen können von Moor überwachsen werden und unterirdische Röhren mit Durchmessern von bis zu einem Meter bilden. An Hängen können durch Trockenrisse auf ähnliche Weise Röhrensysteme entstehen, die beachtliche Wassermengen ableiten können. Solche natürlichen Röhrensysteme wurden z.B. in den waliser Uplands von GILMAN & NEWSON (1980) untersucht.

2.2 Markierungstechnik

Der Einsatz von Markierungsmittel (Tracer) erlaubt einen direkten Einblick in die Bewegungs-, Verteilungs- und Ausbreitungsvorgänge des Grund- und Oberflächenwassers (Leibundgut & Weingartner: 1982).

Käss (1992) teilt die natürlichen und künstlichen Tracer, die allgemein zur Wassermarkierung zur Verfügung stehen, folgendermaßen ein:

- Wasserlösliche Stoffe (Farbstoffe, Salze, Schaumstoffe, Geruchsstoffe und andere Chemikalien, aktive und aktivierungsanalytische Isotope)
- Triftkörper (Sporen, fluoreszierende Kügelchen, Bakterien, Phagen, Geobombe, andere Triftkörper)
- Natürliche Wasserinhaltsstoffe (Umweltisotope, Umweltchemikalien, Umweltorganismen, physikalische Umweltorganismen)

Die geringen Nachweisgrenzen der Fluoreszenztracer (z.B. 0,002 µg/l für Uranin, die am stärksten fluoreszierende Substanz aller bekannten Stoffe (Käss, 1992: 22)) machen diese Stoffe für Untersuchungen der gesättigten und ungesättigten Zone besonders interessant. (Tab. 2.1)

Zur Konzentrationsbestimmung dieser fluoreszierenden Stoffe wird ein Meßverfahren eingesetzt, das z.B. von SCHULMAN (1977) und RINGHARDTZ (1981) eingehend beschrieben wurde. Es nutzt die Eigenschaft dieser organischen Stoffe, Licht zu absorbieren, um es nach kurzer Zeit als längerwellige Strahlung wieder zu emittieren. Dabei werden die Elektronen durch die Energieabsorption vom untersten Schwingungsniveau des energetischen Grundzustandes, der bei 20°C vorherrscht, auf ein höheres Energieniveau angehoben. Danach wird der Überschuß an Schwingungsenergie schnell durch Molekülstöße abgebaut und das Molekül fällt auf das niedrigste Schwingungsniveau des ersten angeregten Zustandes zurück. Von diesem Energiezustand kann das Molekül auf eines der Schwingungsniveaus des Grundzustandes zurückfallen, wobei die abgegebene Energie jetzt in Form von Fluoreszenz abgestrahlt wird. Wenn die Moleküle der Lösung diesen Weg der Energieabstrahlung durchlaufen, ist die Quantenausbeute maximal. Je mehr

Moleküle ihre Energie auf anderen Wegen verlieren, desto kleiner wird die Quantenausbeute.

Tab. 2.2: Extinktions- und Emissionswellenlängen fluoreszierender Farbstoffe (Käss, 1992: 16-48)

Farbstoff	Extinktion Hauptmax. [nm]	Fluoreszenzmax. [nm]
Uranin	491	512
Eosin	516	538
Rhodamin B	554	576
Sulforhodamin B	564	583
Amidorhodamin G	531,5	552
Rhodamin WT	555,5 (trocken) Anregungsmax. 554	580
Rhodamin 6G	526	552
Erythrosin	525	547
Bengalrosa	540 Anregungsmax. 518	535
Pyranin	455 (>pH 7,7) 405 (<pH 7,7)	512
Natrium-Naphthionat	320	420
Amino G Säure	359	450
Lanaperl-Echtgelb	449	508
Amidoflavin	440	518
Lissamin	422 Anregungsmax. 432	508

Die Abstrahlung der Fluoreszenz erfolgt gleichförmig in alle Raumrichtungen. Dabei ist die Energie des abgestrahlten Fluoreszenzlichtes stets geringer oder gleich als die absorbierte Energie, d. h. das Emissionsspektrum ist stets zu längeren Wellenlängen verschoben.

Die Intensität des emittierten Lichtes I_F ergibt sich aus dem Produkt von absorbierter Lichtintensität I_{abs} und der Quanteneffizienz der Fluoreszenz ϕ_F , die

angibt, welcher Bruchteil der absorbierten Lichtquanten wieder als Fluoreszenz emittiert wird (BARCZEWSKI, 1988: 267-281).

$$I_F = I_{abs} \cdot \phi_F \quad (2.4)$$

Die absorbierte Lichtintensität I_{abs} ergibt sich aus der Differenz zwischen eingestrahelter Lichtintensität I_0 und durchgelassener Lichtintensität I ,

$$I_{abs} = (I_0 - I) \quad (2.5)$$

dabei ist I_{abs} von I_0 unabhängig (RINGHARDTZ, 1981: 12-13).

Für den Lichtdurchgang durch einen gelösten Stoff in einem praktisch durchsichtigen Lösungsmittel lautet das LAMBERT-BEER-BOUGUER-Gesetz (GERTHSEN, 1989: 520-521)

$$I = I_0 \cdot e^{-\varepsilon c x} \quad (2.6)$$

- mit ε = Extinktionskoeffizient, der die Intensität der Schwächung einer Strahlung durch ein Medium angibt
 c = Konzentration des gelösten Stoffes
 x = Schichtdicke bzw. Länge der Meßstrecke

Bei der Verwendung eines gelösten Fluoreszenzfarbstoffes ergibt sich für die Fluoreszenzintensität I_F

$$I_F = I_0 \cdot (1 - e^{-\varepsilon c x}) \cdot \phi_F \quad (2.7)$$

Für sehr kleine Konzentrationen, d.h. falls I_{abs} ungefähr gleich 0 ist, kann Gleichung (2.7) vereinfacht werden (BARCZEWSKI, 1988: 267-281), zu

$$I_F = I_0 \cdot \varepsilon \cdot c \cdot x \cdot \phi_F \quad (2.8)$$

oder

$$c = \frac{I_F}{I_0 \cdot \varepsilon \cdot x \cdot \phi_F} \quad (2.9)$$

Gleichung (2.9) setzt voraus, daß die Fluoreszenzintensität I_F eine lineare Funktion der Konzentration c ist. Das ist jedoch bei hohen Substanzkonzentrationen nicht mehr der Fall. Um im Linearitätsbereich zu bleiben, sollte die Maximalkonzentration

$$c_{\max} < \frac{0,05}{\varepsilon \cdot x} \quad (2.10)$$

nicht überschritten werden (RINGHARDTZ, 1981: 12-13).

2.3 Lichtleitertechnik

2.3.1 Entwicklung der Lichtleitertechnik

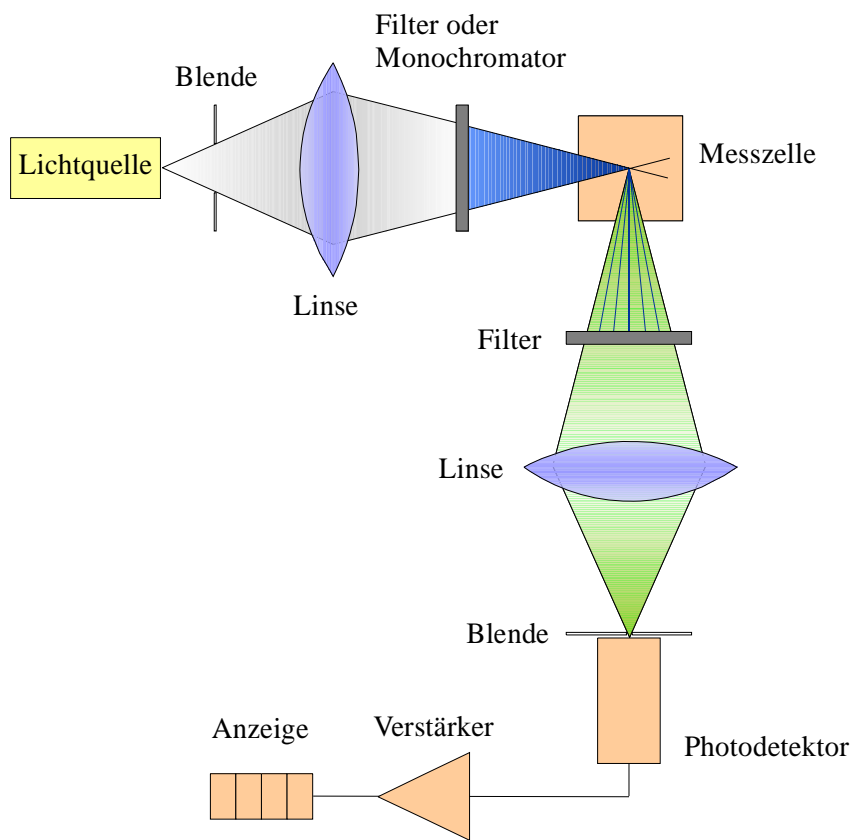
Die Übertragung von Informationen mit Licht ist eigentlich ist keine neue Idee, denn schon mit Sonnenspiegeln und Signallampen, wurden Codes über weite Strecken geleuchtet. ALEXANDER BELL und JOHN TYNDALL machten um 1870 Versuche mit einem optischen Telefon und dem Leiten von Licht in einem Wasserstrahl. NORMAN FRENCH erwarb 1934 ein Patent, in dem das Telefonieren mit Licht über Glasstäbe beschrieben ist. Aber erst in den 60er Jahren wurden modulierbare Halbleiterquellen und dazu passende Silizium-Fotodetektoren erhältlich. DR. CHARLES KAO erfand 1966 die Lichtwellenleiter-Faser und CORNING GLASS zog 1970 die ersten Lichtwellenleiter.

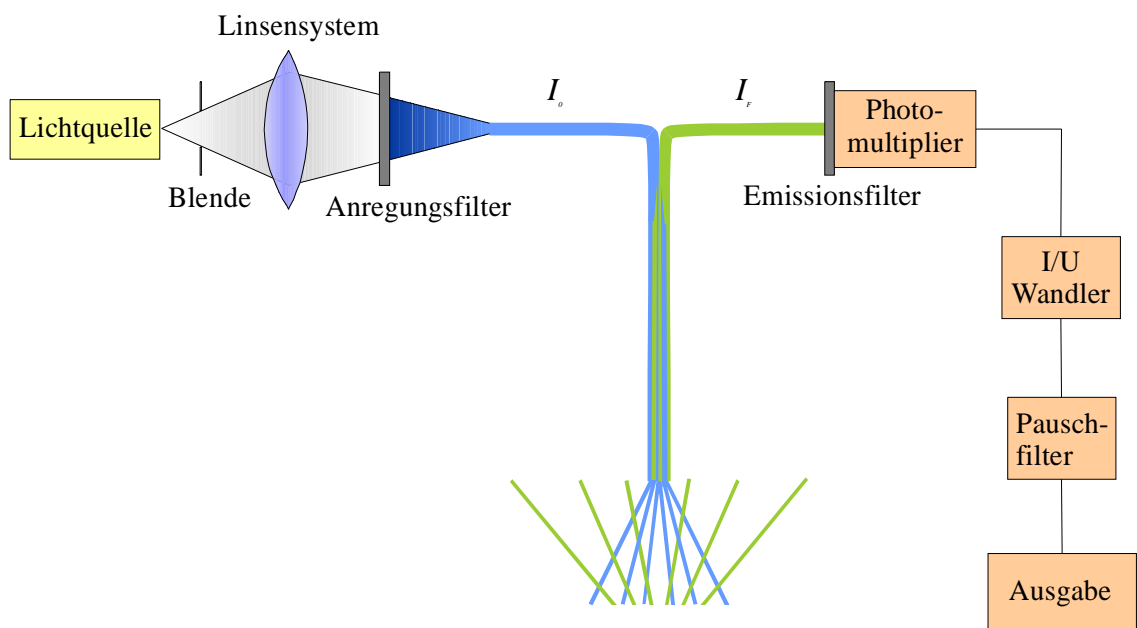
Die Weiterentwicklung von Material, Werkzeugen, Lichtquellen, Detektoren, Stecker, Kupplungen usw. brachte einen vermehrten Einsatz des neuen Mediums (HUBMANN, 1992: 14-17). Der ständig steigende Bedarf an Nachrichtenübermittlung (z.B. Internet) ist ohne die breitbandige und dämpfungsarme Signalübertragung mit Lichtleitern nicht mehr zu decken.

Von der Entwicklung neuer und immer hochwertigerer Komponenten der Lichtleitertechnik profitieren auch andere Fachbereiche, so auch die Hydrologie durch die Entwicklung neuer Meßgeräte. Die Möglichkeit Licht mittels dünnen Glasfasern in und aus kleinen Hohlräumen im Boden zu leiten, macht prinzipiell denn Einsatz von Markierungsmittel zur Gewinnung von Informationen über Makroporen möglich.

2.3.2 Aufbau eines Fluorometers

Die Konzentrationsbestimmung fluoreszierender Tracer erfolgt mit Hilfe eines Fluorometers (Abb. 2.3). Bevor näher auf die Lichtleiterfluorometrie eingegangen wird, soll der prinzipielle Aufbau eines Fluorometers kurz erklärt werden.





Das Licht der Lichtquelle wird nicht direkt in die Meßstelle eingestrahlt, sondern nach Passieren des Anregungs-filters auf ein Lichtleiterbündel oder einen Einzelfaserlichtleiter (Abb. 2.5) fokussiert. Als Anregungsfilter dient z.B. für die Messung von Uranin ein Interferenzfilter mit einer Wellenlänge von 488 nm und einer Halbwertsbreite von 10 nm. Das in den Lichtleiter eingekoppelte Anregungslicht wird an die

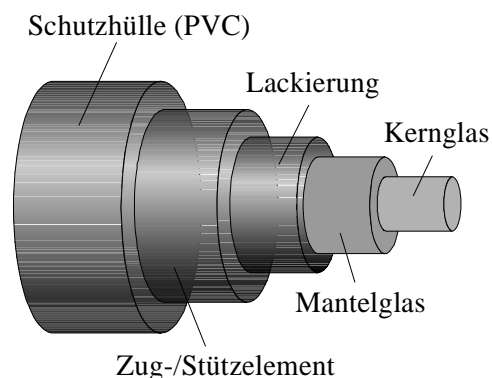


Abb. 2.5: Einzelfaserlichtleiter

Meßstelle geleitet und tritt als Lichtkegel aus dem *Senderlichtleiter* aus, wobei die Lichtintensität mit der Entfernung vom Lichtleiter abnimmt.

In diesem Lichtkegel, der das eigentliche, örtlich allerdings nicht exakt abgegrenzte Meßvolumen darstellt, wird der gelöste Fluoreszenzfarbstoff angeregt und emittiert Fluoreszenzlicht gleichförmig nach allen Seiten. Ein Teil dieses emittierten Fluoreszenzlichtes trifft ebenso wie eventuell rückgestreutes Anregungslicht auf den Lichtleiter, wird zu einem Photodetektor geleitet und in ein weiter verarbeitbares elektrisches Signal gewandelt. Ein Emissionsfilter mit 532 nm verhindert, daß rückgestreutes Anregungslicht zum Fotodetektor gelangen kann.

Als Lichtleiter wurden z.B. PVC-ummantelte Kunststofflichtleiterbündel mit 4 mm Außendurchmesser sowie verlustarme Dickkernlichtleiter mit Durchmessern zwischen 200 μm und 1000 μm verwendet.

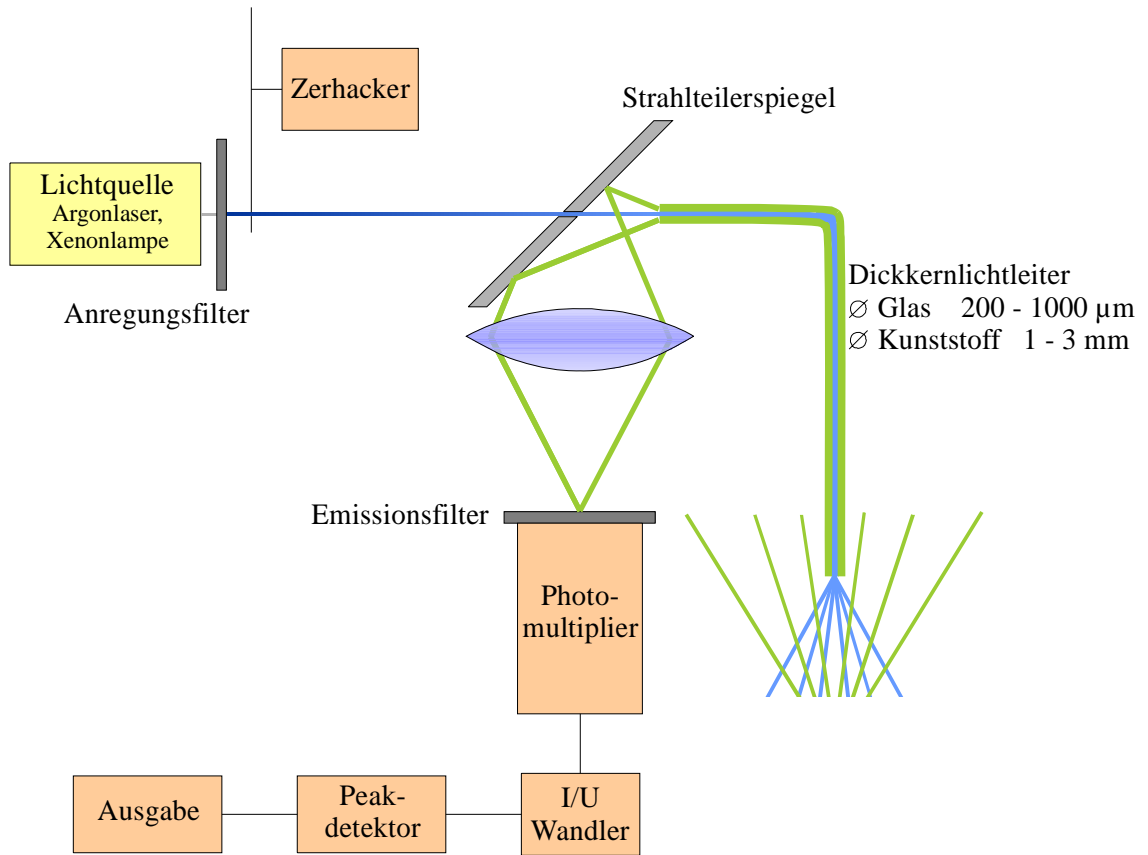
Im Falle des Faserbündelfluorometers läßt sich die Aufteilung von Anregungs- und Emissionsfasern sehr einfach durch Teilung des Lichtleiterbündels bewerkstelligen. Wegen der hohen Lichtverluste in Kunststofflichtleitern sind damit jedoch nur Lichtleiterlängen von 10-15 m möglich. Für Messungen in durchströmten Sandschichten wurde ein Lichtleitersondenkopf hergestellt, in den die Endhülse des Lichtleiters direkt in eine passende konische Führung eingebaut wird. Mit diesem System lassen sich bei Verwendung eines Argon-Lasers Uraninkonzentrationen von etwa 1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ nachweisen (BARCZEWSKI, 1988: 273).

Für längere Übertragungstrecken, z.B. beim Einsatz in Grundwassermeßstellen, müssen dämpfungsarme Quarzglaslichtleiter verwendet werden, bei

denen der Licht transportierende Kern etwa 70-80% der Querschnittsfläche des Lichtleiters einnimmt. Diese Lichtleiter werden handelsüblich mit Durchmessern von 200 µm bis 1000 µm hergestellt. Damit ist gewährleistet, daß an der Meßstelle eine hohe Anregungsintensität herrscht.

Mit diesen Einzelfasern sind von BARCZEWSKI (1988) zwei unterschiedliche Geräte realisiert worden:

- Zur Messung sehr geringer Konzentrationen ($0,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ Uranin) werden zwei Lichtleiter in einen PVC-Schlauch verlegt und in einem Sondenkopf parallel nebeneinander liegend vergossen. In diesem Fall dient ein Lichtleiter zum Transport des Anregungslichtes von der Lichtquelle an die Meßstelle, der andere zum Transport des emittierten Fluoreszenzlichtes von der Meßstelle zum Photodetektor.
- Sowohl bei der Geschwindigkeitsmessung nach dem Tracerpuls-Laufzeitverfahren als auch bei der Untersuchung der Strömungsverhältnisse technischer Anlagen muß stets darauf geachtet werden, die in die Strömung einzubringenden Sonden so klein wie möglich zu halten, um eine Störung der Strömung durch den Sensor weitgehend zu vermeiden. Zu diesem Zweck wurde ein Einzelfasersystem gebaut, bei dem, zumindestens bei nicht zu hohen Strömungsgeschwindigkeiten, die Lichtleiterfaser ohne einen speziellen Sondenkopf in die Strömung eingebracht wird. Da solche Systeme im allgemeinen (anders als bei der Messung in Grundwassermeßstellen oder in durchströmten Sandschichten) unter Fremdlichteinfluß arbeiten müssen, muß der Störeinfluß des Fremdlichtes durch Zerhacken des Anregungslichtes und entsprechende elektronische Auswertung eliminiert werden. Im Gegensatz zu den Faserbündel- oder Zweifaserfluorometern muß hier sowohl der Transport des Anregungslichtes zur Meßstelle, als auch der Rücktransport des emittierten Fluoreszenzlichtes von der Meßstelle zum Photodetektor über einen einzigen Lichtleiter erfolgen.



2.3.4 Meßelektronik für Lichtleiterfluorometer

Zur weiteren Auswertung der Photodetektorsignale werden Stromspannungswandler verwendet, die Ströme in proportionale Spannungen wandeln und dann sowohl mit einem Computerdatenerfassungssystem automatisch erfaßt, als auch mit einem Linienschreiber registriert werden können.

Für Messungen bei Fremdlicht entwickelte BARCZEWSKI (1988) eine spezielle Chopperelektronik. Dabei wurde eine Schaltung gewählt, die es unabhängig von der Zehackerfrequenz und eventuellen Schwankungen der Chopperfrequenz möglich macht, die Fluoreszenzintensität exakt zu messen. Hierzu wird das Photodetektorsignal zunächst in eine Spannung gewandelt, die mit Hilfe von zwei Peak-Dektoren jeweils auf den minimalen bzw. den maximalen Wert der Photodetektorspannung abgefragt wird. Durch Differenzbildung des Maximalwertes (Anregung durch Fremdlicht plus Lichtquelle) und des Minimalwertes (Anregung nur durch Fremdlicht) wird dann nur die durch die Lichtquelle induzierte Fluoreszenzemission gemessen. Eine entsprechende Taktsteuerung sorgt hierbei dafür, daß die Detektion des Minimal- bzw. Maximalwertes stets zum richtigen Zeitpunkt beginnt.

3 Endoskopie

3.1 Was ist Endoskopie?

Die Endoskopie ist das Hineinsehen in schwer zugängliche Prüfstellen oder Hohlräume mit Hilfe von Endoskopen. Endoskope sind dünne optische Instrumente, die durch eine Bohrung oder eine natürlich oder künstlich erzeugte Öffnung in das Innere eines Objektes eingeführt werden und die somit eine direkte visuelle Inspektion des Innenraumes erlauben. Ist der zu untersuchende Hohlraum auf geradem Zugangsweg erreichbar, so bieten starre Endoskope die vielseitigsten Möglichkeiten zur Inspektion. Flexible Endoskope werden überall dort eingesetzt, wo der zu untersuchende Hohlraum nur auf gekrümmtem Wege zu erreichen ist (STORZ, 1996: F1).

Die Aufgabe eines Endoskopes besteht in erster Linie darin, Licht in einen Hohlraum hinein- und ein Bild herauszubringen. Die Entwicklung der Endoskopie wurde zunächst fast ausschließlich durch ihre medizinischen Anwendungen beeinflusst, denn am lebenden Körper war der Zwang zu einer verletzungsfreien Inspektion und Diagnose von Körperhöhlen am stärksten. In den letzten Jahrzehnten entwickelte sich neben dem medizinischen ein technischer Zweig der Endoskopie, der sehr spezifische Entwicklungslinien aufweist. Endoskope werden heute z.B. zur Inspektion von Triebwerken und Motoren in der Luftfahrt und im Kraftfahrzeugbereich oder zur Bausubstanzprüfung an Gebäuden eingesetzt (RELING, 1997: 4-9). Die Verbreitung der Endoskopie in verschiedensten Einsatzbereichen fordert auch die Entwicklung immer neuer Variations- und Erweiterungsmöglichkeiten dieser Technik.

In folgenden Abschnitten soll eine neue Technik vorgestellt werden, die auf der Basis von flexiblen Endoskopen entwickelt wurde und zur Gewinnung von Informationen über einen Bodenkörper, speziell über die Domäne der Makroporen und deren Interaktion mit der umgebenden Matrix eingesetzt werden kann.

3.2 Beschreibung eines flexiblen Endoskopes

Die folgenden Ausführungen beziehen sich ausschließlich auf die Standardprodukte der Firma *Storz*.

Die Optik eines Endoskopes muß zwei Funktionen erfüllen. Einerseits muß Licht von einer externen Lichtquelle in einen Hohlraum zu dessen Ausleuchtung geleitet werden und andererseits muß ein Bild des beleuchteten Hohlraumes vom Objektiv an der Spitze des Endoskopes über ein Okular zum Auge des Betrachters übertragen werden.

Die zur Ausleuchtung dienende Lichtübertragungsoptik kann aus einem oder mehreren Lichtleitern bestehen. Dazu werden üblicherweise Faserbündel aus Glas oder Kunststoff verwendet. Aus einer externen Lichtquelle stammendes Licht wird auf diesem Wege zur Endoskopspitze transportiert, wo es kegelförmig austritt und so den Hohlraum beleuchtet. Bei dem speziellen Endoskop, das von der Firma *Storz* für diese Arbeit zur Verfügung gestellt wurde, besteht die Lichtübertragungsoptik aus einem Glasfaserbündel. Das Licht wird extern von einem Kaltlichtprojektor über einen Stecker in das Faserbündel eingespeist. Auf dem Weg zur Spitze des *Endoskopes* ist das Faserbündel in zwei Hälften aufgetrennt, so daß zwei Lichtaustritte in unmittelbarer Nähe des Objektivs eine helle und schattenfreie Ausleuchtung des Hohlraumes gewährleisten (Abb. 3.1 b).

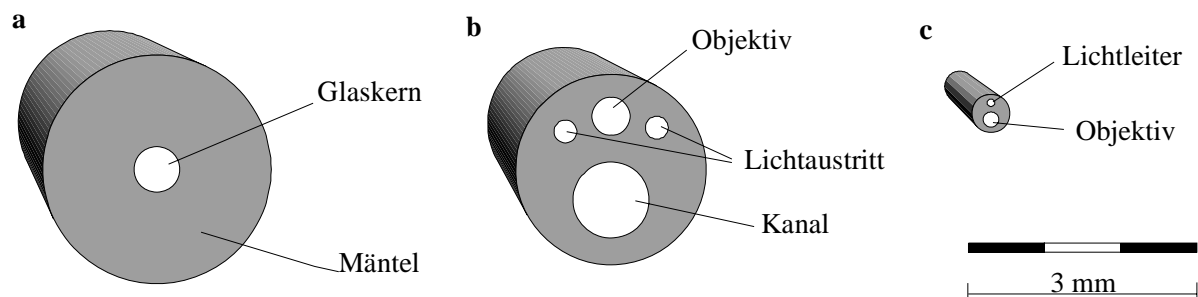


Abb. 3.1: Größenvergleich zwischen Einzelfaserlichtleiter und Endoskopen

- a. Einzelfaserlichtleiter mit 600 μm Glaskern, \varnothing ca. 3 mm;
- b. Endoskopspitze: Objektiv, zwei Lichtaustritte, Arbeitskanal \varnothing 2,5 mm;
- c. Endoskopspitze: Objektiv, ein Lichtaustritt, \varnothing 0,5 mm;

Um ein Bild übertragen zu können, ist ein geordnetes Lichtleiterbündel notwendig (Abb. 3.2), d.h. die Anordnung der Einzelfasern sind an beiden Enden gleich. Die Qualität des Bildes hängt dabei vom Material und von der Anzahl der

Einzelfasern ab. Mit steigender Anzahl der Fasern verbessert sich die

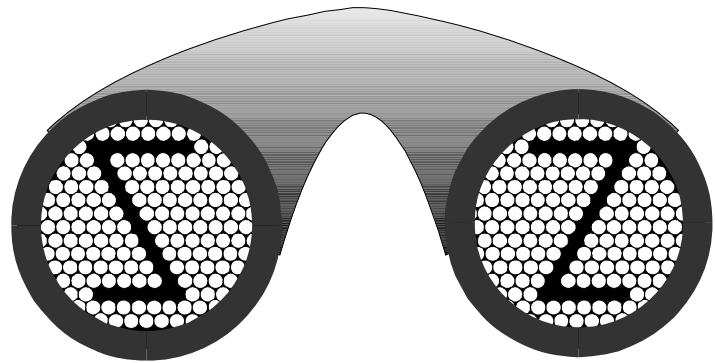


Abb. 3.2: Geordnetes Faserbündel

Auflösung, und damit auch die Detailerkennbarkeit. Der Bildleiter verbindet das Objektiv an der Spitze des Endoskopes mit dem Okulargehäuse. Hier wird das Bild durch ein Linsensystem aufbereitet, so daß es für den Betrachter optimal verwertet werden kann. So kann z.B. durch einen Dioptrienausgleich das Okular auf die Sehschärfe des Betrachters eingestellt werden. Es besteht außerdem die Möglichkeit, das Bild vom Okular über eine Kupplung in eine Videokamera und damit auf einen Bildschirm zu übertragen. So können die aufgenommenen Bilder mehreren Personen gleichzeitig zugänglich gemacht werden. Außerdem können Videoaufzeichnungen zur Dokumentation von Untersuchungen genutzt oder weiter ausgewertet werden.

Flexible Endoskope können zusätzlich Arbeitskanäle enthalten, durch die Flüssigkeiten und Gase aus einem Hohlraum entnommen oder in einen Hohlraum eingebracht werden können (Abb. 3.1 b). Zusätzlich können Endoskope mit miniaturisierten Werkzeugen oder Meßgeräten ausgerüstet sein, die in den Hohlraum eingeführt und von außen bedient werden können.

Grundsätzlich besteht bei Endoskopen die Möglichkeit das Objektiv an der Spitze abzuwinkeln. Bei Durchmessern über etwa 1 mm kann das Objektiv in zwei Richtungen abgewinkelt werden. Bei Endoskopen mit einem Durchmesser über 5 mm ist eine Abwinkelung in vier Richtungen möglich, also auch nach links und rechts (STORZ, 1996: F5).

Alle flexiblen Endoskope sind flüssigkeitsdicht. Die Ummantelung besteht aus einer Metallwendel, die mit einer gleitfähigen Kunststoff-Außenhaut umgeben ist. Um flexible Endoskope gegen äußere Einflüsse stärker zu schützen, können sie zusätzlich mit einem widerstandsfähigen Metallgewebes Schlauch umgeben sein.

3.3 Varianten, Funktionen und Erweiterungen flexibler Endoskope

Für den Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde von der Firma *Storz* ein medizinisches Endoskop zur Verfügung gestellt, um grundlegende Fragen über die Verwendbarkeit dieser Technik zu beantworten. Während der Laborarbeiten wurde das Gerät allerdings irreparabel beschädigt, so daß die vorgesehenen Versuche nicht mehr abgeschlossen werden konnten. Die folgenden Überlegungen müssen aus diesem Grund zum großen Teil theoretisch bleiben und können leider nicht durch Versuchsreihen ergänzt werden.

Das Ausgangsprodukt, also das von der Firma *Storz* zur Verfügung gestellte Endoskop, hat eine Länge von 70 cm und einen Durchmesser von 3,5 mm. Es ist mit zwei Lichtausgängen und einem Arbeitskanäle ausgerüstet (vgl. Abb. 3.1 b). Das Objektiv ist 180° nach oben und 90° nach unten abwinkelbar. Im folgenden Abschnitt sollen Variationen und Erweiterungsmöglichkeiten dieses Endoskopes aufgezeigt werden, die den Einsatz dieser Technik für hydrologische Untersuchungen ermöglichen.

3.3.1 Endoskoplänge

Der begrenzende Faktor für die Länge eines Endoskopes ist der Bildleiter, weil solche geordneten Lichtleiterbündel extrem schwierig herzustellen sind. Die maximale Länge eines Bildleiters bei einem Endoskop mit 3,5 mm Durchmesser beträgt nach Aussage der Mitarbeiter der Firma *Storz* 1,8 m. Nach Aussage von Mitarbeiter der Firma *Schölly Fiberoptik*, Denzlingen, wären Bildleiter und damit Endoskope mit Längen von ca. 50 m zu realisieren. Dies sei möglich, weil die Firma *Schölly* andere Materialien zur Herstellung von Bildleitern verwende, die jedoch nicht die Qualität bzgl. der Auflösung und Lichtstärke, der von der Firma *Storz* entwickelten Bildleiter erreiche.

3.3.2 Endoskopdurchmesser

Der Gesamtdurchmesser nimmt natürlich mit den Durchmessern der einzelnen Licht- und Bildleiter zu. Mit steigender Anzahl von Einzelfasern (bis über 100000) steigt die Auflösung eines Bildleiters. Das Endoskop mit Arbeitskanal, einer abwinkelbaren Spitze und einem Durchmesser unter 3 mm enthält einen Bildleiter mit etwa 4000 Einzelfasern. Die entsprechende Auflösung reicht aus, um z.B. die Beschaffenheit der Makroporenwände untersuchen zu können.

Der minimale Durchmesser eines Endoskopes mit den erwähnten Funktionen, ist also auf den Einsatz in größere Makroporen über 3 mm beschränkt.

3.3.3 Visuelle Beobachtung

Zur Gewinnung neuer Erkenntnisse über die Domäne der Makroporen im Boden kann in erster Linie die eigentliche Grundfunktion eines Endoskopes genutzt werden, nämlich das Sichtbarmachen von Einzelheiten innerhalb einer Makropore.

Es ist prinzipiell möglich, die Makroporengeometrie und die Beschaffenheit der Wände näher zu untersuchen oder den Wassereintritt in Makroporen während Regenereignissen zu beobachten.

3.3.4 Arbeitskanal

Bei der Einführung des Endoskopes in den Boden ist damit zu rechnen, daß das Objektiv verschmutzt. Ein Arbeitskanal kann dazu benutzt werden, das Objektiv frei zu spülen. Dabei ist es unter Umständen notwendig, einen Teil des Wasserstrahls gegen das Objektiv zu lenken, ohne dabei das Blickfeld zu sehr einzuschränken.

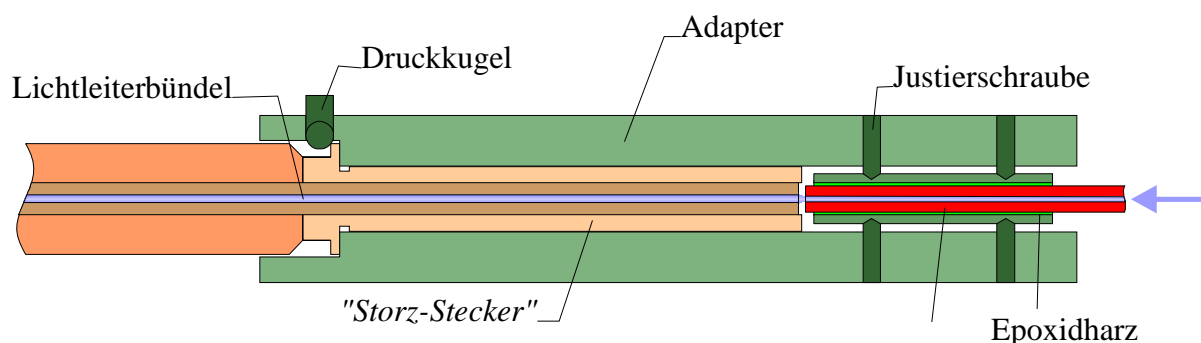
Ein Arbeitskanal kann ebenfalls zum Einbringen oder Absaugen von Flüssigkeiten oder Gasen benutzt werden. So könnten Markierungsstoffe in verschiedenen Stellen eines für das Endoskop zugänglichen Makroporensystems eingebracht werden. Durch die Auswertung von daraus resultierenden Durchgangskurven des Markierungsstoffes könnten dann wichtige Erkenntnisse über Fließgeschwindigkeiten oder Interaktionen mit der umgebenden Matrix

gewonnen werden. Umgekehrt können auch Proben aus einem Hohlraum eines Makroporensystems entnommen und anschließend analysiert werden.

3.3.5 In-situ-Messung von Fluoreszenztracer-Konzentrationen

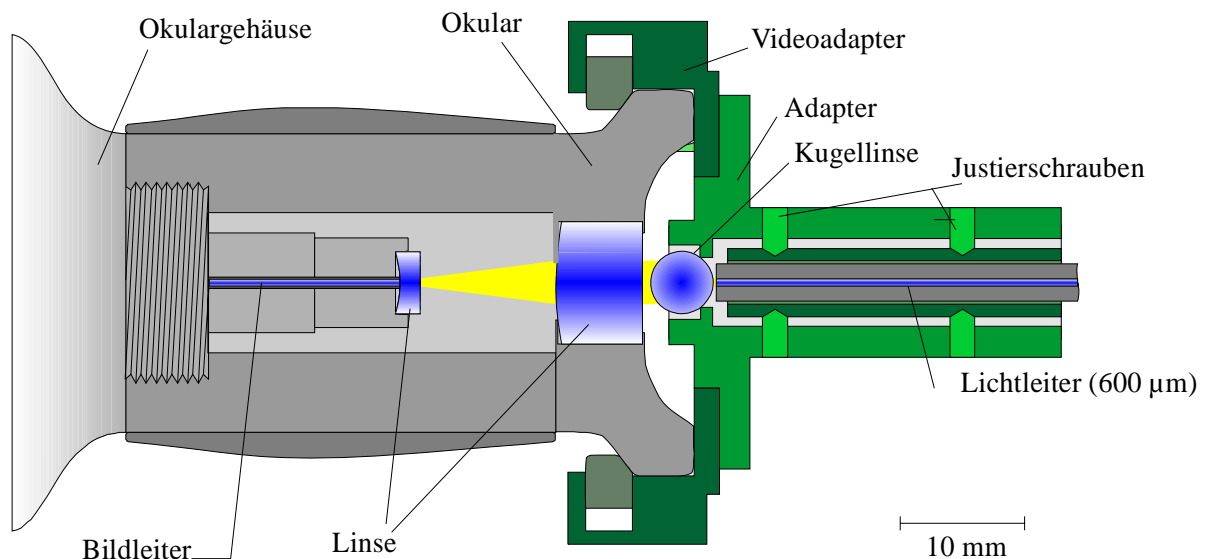
Die Faserbündel, Lichtleiter und Bildleiter, können prinzipiell dazu benutzt werden, um Konzentrationen von fluoreszierenden Markierungsstoffen zu bestimmen. Üblicherweise sind Lichtquellen und Fluorometer zur Umwandlung von Emissionslicht in elektrische Spannung auf die Verwendung von Steckverbindungen für Einzelfaserlichtleiter (SMA-Stecker) ausgelegt. Um grundsätzlich die Tauglichkeit des Licht- bzw. Bildleiters als Übertragungsmedium für Anregungs- bzw. Emissionslicht zu prüfen, war es notwendig, Adapter zu entwickeln und anfertigen zu lassen.

Bei *Endoskopen* wird das Licht zur Beleuchtung des Hohlraumes von einem Kaltlichtprojektor erzeugt und über eine ausschließlich von der Firma *Storz* verwendeten Steckverbindung in den Lichtleiter eingestrahlt. Um das Anregungslicht von einem Dickkernlichtleiter in den speziellen *Storz-Stecker* zu übertragen, wurden der Adapter A gebaut (Abb. 3.3). Das Anregungslicht tritt dann aus den beiden Lichtausgängen dicht neben dem Objektiv kegelförmig aus (Abb.



Das vom Tracer emittierte Licht tritt durch das Objektiv ein und wird über ein Linsensystem in das geordnete Glasfaserbündel übertragen. Im Okulargehäuse überträgt ein zweites Linsensystem das Bild auf das Okular.

Um die Endoskopspitze in einem Hohlraum für die in-situ-Messung positionieren zu können, muß die ursprüngliche Funktion des Endoskopes, nämlich die Möglichkeit den ausgeleuchteten Hohlraum visuell zu betrachten, in Anspruch genommen werden. Bei der Fluoreszenzmessung muß der aus dem Okular austretende Lichtstrahl auf ein Ende eines Einzelfaserlichtleiters fokussiert werden, an dessen anderem Ende zur weiteren Verarbeitung des Lichtsignals ein SMA-Stecker befestigt ist. Dieser Stecker wird dann in ein Lichtleiterfluorometer eingesteckt, um die Intensität des emittierten Lichtes zu messen.



(visuelle Optik ↔ Fluoreszenzmessungsoptik)

möglichst schnell und problemlos durchführen zu können, wurde der Adapter B entwickelt (Abb. 3.4). Er basiert auf einem von der Firma *Storz* zur Verfügung gestellten Videoadapter und kann mittels eines Bajonett-Verschlusses auf das Okulargehäuse aufgesetzt werden. Im Adapter B ist eine 5 mm Kugellinse integriert. Damit wird der 4 mm breite Lichtstrahl, der aus dem Okular austritt, auf den Einzelfaserlichtleiter fokussiert. Durch mehrere Justierschrauben kann der Brennpunkt des Lichtstrahls optimal auf den 600 µm Glaskern ausgerichtet werden, um die maximale Lichtausbeute zu erhalten.

Bei ersten Vorversuchen mit dieser Konstruktion konnten Uraninkonzentrationen von 1 mg/m^3 nachgewiesen werden. Zum Vergleich wurde auch mit einem Zweifaserfluorometer (2.3.3) gemessen, der aus zwei nebeneinander liegenden Einzelfaserlichtleitern mit $600 \text{ }\mu\text{m}$ Durchmesser besteht. Die Vergleichsmessung ergab Spannungen, die um etwa 3 Größenordnungen höher lagen als die des Endoskopes. Die Ursache für die geringen Spannungen, die sich für das Endoskop ergaben, ist in erster Linie bei der Übertragung des Emissionslichts zu suchen. Das emittierte Licht passiert auf dem Weg zum SMA-Stecker drei Linsensysteme (Objektiv, Okular und Adapter). Bei jedem Übergang eines Lichtstrahles in ein anderes Medium wird ein Teil der Strahlung reflektiert. Durch die mehrmaligen Luft-Glas- bzw. Glas-Luft-Übergänge wird die Intensität des Emissionslichtes stark abgeschwächt.

Um die Nachweisempfindlichkeit zu verbessern, bietet sich eine alternative Verwendung des zur Beleuchtung dienenden Faserbündels im Endoskop an. Dabei muß jedoch das *Standardendoskop* konstruktiv verändert werden. Diese Alternative besteht darin, das Bildübertragungssystem als Emissionslichtleitung zu verlassen und sowohl Anregungs-, als auch Emissionslicht durch die Beleuchtungsoptik zu leiten. Das dabei verwendete Glasfaserbündel kann in zwei Hälften aufgetrennt und direkt mit SMA-Steckern versehen werden (vgl. 2.3.3). Dann kann eines der beiden Faserbündelhälften für das Anregungslicht und das andere für das Emissionslicht verwendet werden. So kann die Nachweisempfindlichkeit für die Fluoreszenzmessung um etwa 3 Größenordnungen verbessert werden, was einer Nachweisgrenze von $1 \text{ }\mu\text{g/m}^3$ entspricht.

3.4 Fazit

Die Überlegungen in diesem Abschnitt zeigen die prinzipiell großen Möglichkeiten, die sich durch die Endoskopie für hydrologische Untersuchungen ergeben. Besonders vielversprechend ist dabei die Multifunktionalität dieser Technik, die sich bereits durch geringe konstruktive Veränderungen der Standardausführungen von Endoskopen erreichen läßt. Ein Endoskop mit einem Durchmesser unter 3 mm bietet die Möglichkeit,

- Bilder eines Hohlraumes zu übertragen, die sich inmitten eines Bodenkörpers befinden
- Flüssigkeiten und Gase aus Hohlräumen im Boden zu entnehmen oder einzubringen
- miniaturisierte Werkzeuge und Meßgeräte in einen Hohlraum einzuführen
- tracermethodische Untersuchungen durchzuführen

Mit der Endoskopietechnik ist es möglich wertvolle Informationen über Makroporen zu gewinnen, die für die Modellierung der Fließvorgänge in der ungesättigten Zone von großem Nutzen sein können.

4 Modellierung von Makroporenfluß

Für die Modellierung von Makroporenfluß können zwei Modellansätze unterschieden werden:

- Einfache Modelle, bei denen der Mikro- und Makroporenfluß nicht getrennt betrachtet wird
- Zweidomänen-Modelle oder Modellsysteme bei denen Mikro- und Makroporenfluß getrennt betrachtet und die Interaktionen zwischen diesen Domänen berücksichtigt werden

4.1 Einfache Modelle

Einen wichtigen Vertreter dieser Gruppe stellt das Capillary Bundle Modell dar, das hier näher beschrieben werden soll.

Capillary Bundle Model (CBM)

Das CBM basiert auf der Grundlage des Potentialkonzeptes, das an dieser Stelle kurz beschrieben werden soll:

Bodenwasser der ungesättigten Zone beinhaltet eine gewisse potentielle Energie, die mit Hilfe des Potentialkonzeptes beschrieben werden kann. Potentiale sind relative Größen. Die Potentialdifferenz zwischen zwei Punkten entspricht der Arbeit, die geleistet werden muß, um eine Wassermenge von einem Punkt zum anderen zu bewegen. In umgekehrter Bewegungsrichtung wird diese Energie wieder frei. Die Bodenwasserbewegung erfolgt entsprechend aus dem Streben nach Potentialausgleich.

Die Gesamtenergiedichte des Bodenwassers, das vom sogenannten hydraulischen Potential erfaßt wird, setzt sich aus Teilpotentialen zusammen. Davon sind normalerweise nur das Gravitations- und das Druckpotential von Bedeutung sind (MAURER, 1997: 40). Werden diese Potentiale auf das Gewicht des Wassers bezogen, ergibt sich die Dimension einer Länge. Das Gravitationspotential hat seinen Ursprung im Schwerekraftfeld der Erde. Das Druckpotential im ungesättigten Boden entspricht den Saugspannungen, die benötigt werden, um das durch Adhäsions- und Kapillarkräfte im Bodengefüge gehaltene Wasser zu lösen.

In dem von JURY (1991) beschriebenen CBM wird ein Bodenvolumen als ein Bündel kapillarer Röhren mit unterschiedlichen Radien betrachtet. Aus der gemessenen Beziehung zwischen Matrixpotential und Wassergehalt wird die ungesättigte, hydraulische Leitfähigkeit in Abhängigkeit des Wassergehaltes berechnet. Zur Berechnung des Röhrendurchflusses dient das Poiseulle-Gesetz. Es besagt, daß bei einer gegebenen hydrostatischen Druckdifferenz ΔP über einer Länge L einer kapillaren Röhre, das Durchflußvolumen mit der 4. Potenz des Radius R zunimmt:

$$Q = \frac{\pi R^4 \Delta P}{8L\nu} \quad (4.1)$$

Die Anzahl und Größe der kapillaren Röhren in dem Bündel wird so gewählt, daß die Matrixpotential-Wassergehalts-Funktion (Ψ/θ - Funktion) des realen Bodens auch für das im Modell verwendete Röhrenbündel gültig ist. Das Bündel besteht dabei aus kapillaren Röhren einheitlicher Länge L_c , die weder *tote Enden* noch Bereiche aufweisen, in denen das Wasser stagniert.

Die einzelnen Röhren können gewunden sein und bilden insgesamt ein Kapillarenbündel in der Form einer Bodensäule der Länge L ($\leq L_c$) und der Querschnittsfläche A . In der Säule herrscht ein hydraulischer Druckgradient ΔH , der bewirkt, daß sich der Fluß innerhalb jeder kapillaren Röhre gemäß dem Gesetz von POISEULLE verhält.

Wenn alle Röhren gefüllt sind berechnet sich demnach das gesamte Durchflußvolumen Q_g der Säule aus der Summe aller Durchflußvolumina der einzelnen Röhren:

$$Q_g = \sum_{j=1}^M N_j Q_j = \frac{\pi \rho_w g}{8\nu} \frac{\Delta H}{L_c} \sum_{j=1}^M N_j R_j^4 \quad (4.2)$$

Dabei ist N_j die jeweilige Anzahl der Röhren mit dem entsprechenden Radius R_j und M die Menge der dabei verwendeten Radiusgrößenklassen. Der auf die Querschnittsfläche bezogene Fluß J_w durch die Säule ist dann

$$J_w = \frac{Q_g}{A} = \frac{\pi \rho_w g}{8\nu} \frac{\Delta H}{L_c} \sum_{j=1}^M n_j R_j^4 \quad (4.3)$$

wobei $n_j = \frac{N_j}{A}$ die Anzahl der Röhren mit dem Radius R_j pro Flächeneinheit im Bündel darstellt.

Zur Anpassung des CBM an den realen Boden dient die Ψ/θ -Funktion. Dabei wird die Ψ/θ -Kurve des realen Bodens in eine Anzahl gleich großer Wassergehaltsintervalle einheitlicher Größe $\Delta\theta$ aufgeteilt. Das Matrixpotential Ψ wird aus der Ψ/θ -Funktion bestimmt, so daß $\Psi_1 = \Psi(\theta_s - \Delta\theta)$, $\Psi_2 = \Psi(\theta_s - 2\Delta\theta)$, ... (Abb. 4.1).

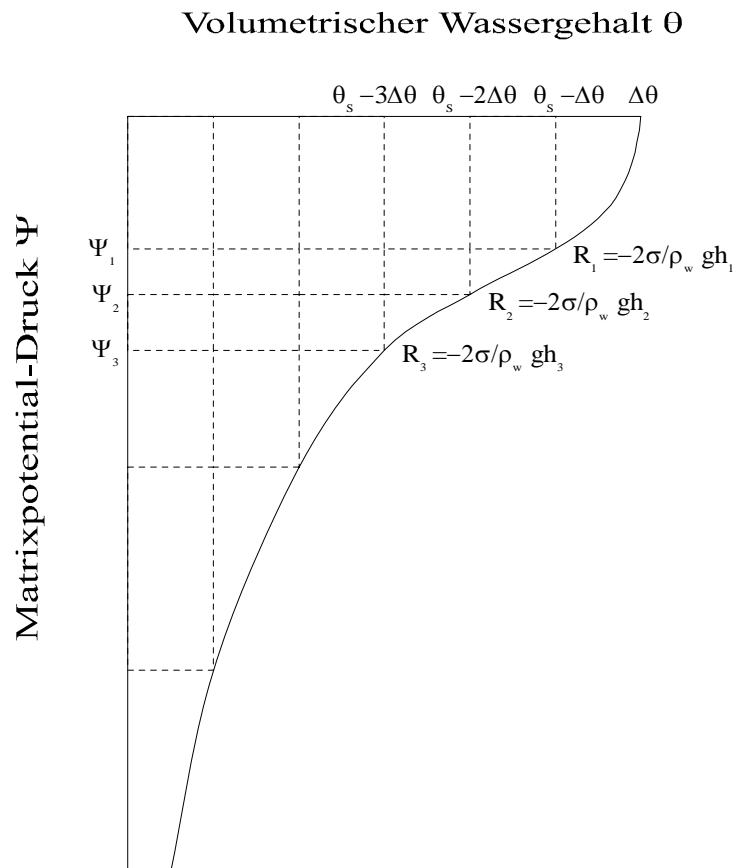


Abb. 4.1: Kapillargrößen

Dabei wird davon ausgegangen, daß eine Dränage der Röhren mit dem Radius

$$R_1 = \frac{-2\sigma}{\rho_w g \Psi_1} \quad (4.3)$$

eintritt, wenn sich der Wassergehalt von θ_s (wenn alle Röhren gefüllt sind) auf $(\theta_s - \Delta\theta)$ verringert. Die leeren Kapillaren sind dann nicht mehr an den Fließbewegungen beteiligt. Die Anzahl n_1 der Röhren mit dem Radius R_1 pro Flächeneinheit muß dabei mit der Wassergehaltsänderung $\Delta\theta$ übereinstimmen.

Jeder Radius entspricht gemäß Gl. 4.3 einem Potential, so daß sich die hydraulische Leitfähigkeit K des Bodens ergibt aus

$$K(\theta_s - i\Delta\theta) = \frac{\tau\sigma^2\Delta\theta}{2\nu\rho_w g} \sum_{j=i+1}^M \frac{1}{\Psi_j^2} \quad (4.4)$$

Der Torsionsfaktor $\tau = L/L_c$ gibt dabei das Verhältnis von Säulenlänge zu Kapillarröhrenlänge an und muß bei der Anpassung des Modells an die gemessenen Daten bestimmt werden. Da die Länge der Röhren einheitlich angenommen wird, muß τ konstant sein. Die richtige Wahl dieser Konstante brachte bei verschiedenen Untersuchungen zufriedenstellende Ergebnisse (GREEN & COREY, 1971: 3 - 8; JACKSON, 1972: 380 - 383). Für viele Böden bringt das CBM jedoch nur dann annehmbare Ergebnisse, wenn der Torsionsfaktor τ in Abhängigkeit des Wassergehaltes θ variieren kann. Solange τ aber nur durch die Kalibrierung des Modells bestimmt werden kann, stellt das Modell in erster Linie eine brauchbare Hilfe für die Veranschaulichung der Beziehung zwischen Leitfähigkeit, Porengröße und Wassergehalt dar (JURY, 1991: 93).

Der Torsionsfaktor τ und der Radius R der Röhren beschreiben die Makroporengestalt. Die Anzahl N der Röhren mit bestimmtem Radius kann als Beschreibung der Makroporosität gesehen werden. Keiner dieser Parameter kann direkt bestimmt werden. N und R werden aus Geländebeobachtungen abgeschätzt und τ wird als Anpassungsparameter verwendet.

4.2 Zweidomänenmodelle und Modellsysteme

Diese Gruppe beinhaltet die derzeit fortschrittlichsten Modelle. Sie gehen von einem Konzept aus, welches mehrere Domänen berücksichtigt. Unter besonderer Betrachtung der bei den Modellen verwendeten Parameter, sollen einige Vertreter dieser Modellgruppe genannt und das Modellsystem CATFLOW sowie das Fließmodell QSOIL näher beschrieben werden.

Bei dem von BRONSTERT & PLATE (1997) vorgestellten Modellsystem HILLFLOW wird die Infiltration aus den aktuellen Infiltrationsraten von Mikro- und Makroporen berechnet (BRONSTERT & PLATE, 1997: 181). Dabei ist die Infiltrationsrate vom Volumenanteil der Makroporen am Gesamtvolumen und der Tiefe der Makroporenschicht abhängig.

Bei dem von AHUJA ET AL. (1995) bewerteten und verfeinerten Root Zone Water Quality Model (RZWQM) wird die Infiltration in die Makroporen ebenfalls von der Infiltration in die Matrix getrennt betrachtet. Die radiale Infiltration durch die Makroporenwandungen in die Matrix wird mit dem Green-Ampt-Verfahren und einem Korrekturfaktor bestimmt (AHUJA ET AL., 1995: 1235).

DI PIETRO & LAFOLIE (1991) legen bei der Modellierung des Makroporenflusses die Vorstellung der kinematischen Welle zugrunde. Bei diesem *Kinematic-Wave Model* (KWM) wird der Fluß durch die Makroporen als eine Funktion des Wassergehaltes in den Makroporen betrachtet.

Im von EMERMAN (1995) vorgestellten *Tipping Bucket Model* (TBM), das DA SILVA & DE JONG (1986) als *Water Budget Model* und LOPES ET AL. (1982) und RAO ET AL. (1990) als *Soil Moisture Accounting Model* bezeichnen, werden Parameter für Wasserbewegungen sowohl von der Matrix in die Makroporen, als auch in umgekehrter Richtung eingeführt (EMERMAN, 1995: 23).

Die bei diesen Modellen verwendeten *Makroporenparameter* sind in Tabelle 5.1 dargestellt.

- **Modellsystem CATFLOW**

MAURER (1997) beschäftigt sich mit der zeitkontinuierlichen Modellierung der Wasserdynamik im System des kleinen Einzugsgebietes. Dabei wird der Bereich der oberen Bodenzone einschließlich der Vegetation betrachtet, dem Atmosphäre und gegebenenfalls vorhandenes Grundwasser Randbedingungen aufprägen.

Im Hinblick auf das übergeordnete Ziel der Modellierung von Stofftransportprozessen auf der Oberfläche und im Untergrund wird eine prozeßorientierte Herangehensweise gewählt. Diese soll die innere Gebietsstruktur möglichst weitgehend nachbilden, um auf diese Weise Wechselwirkungen zwischen Teilsystemen des Gebietes untersuchen zu können und gegebenenfalls Vereinfachungen zu finden.

Dazu wurde das Modellsystem CATFLOW entwickelt, das die relevanten Teilprozesse des Wasserkreislaufes in kleinen Einzugsgebieten räumlich und zeitlich differenziert simulieren kann. Besondere Kennzeichen dieses Modellsystems sind:

- Problemangepaßte Gebietszerlegung und Zeitschrittsteuerung
- Prozeßnahe Modellierung
- Flexible raum-zeitliche Auflösung von Randbedingungen und Parametern
- Relationales Datenmanagement

Das gesamte Modellsystem wurde dabei durch die Kombination von einzeln angepaßten und untersuchten Teilmodellen zusammengesetzt (Abb. 4.2). Im Modellsystem werden z.B. Verdunstung, Interzeption, Oberflächen- und Gerinneabfluß sowie zweidimensionale Grundwasserbewegungen (ungesättigt - gesättigt) und Infiltration in Mikro- und Makroporen berücksichtigt.

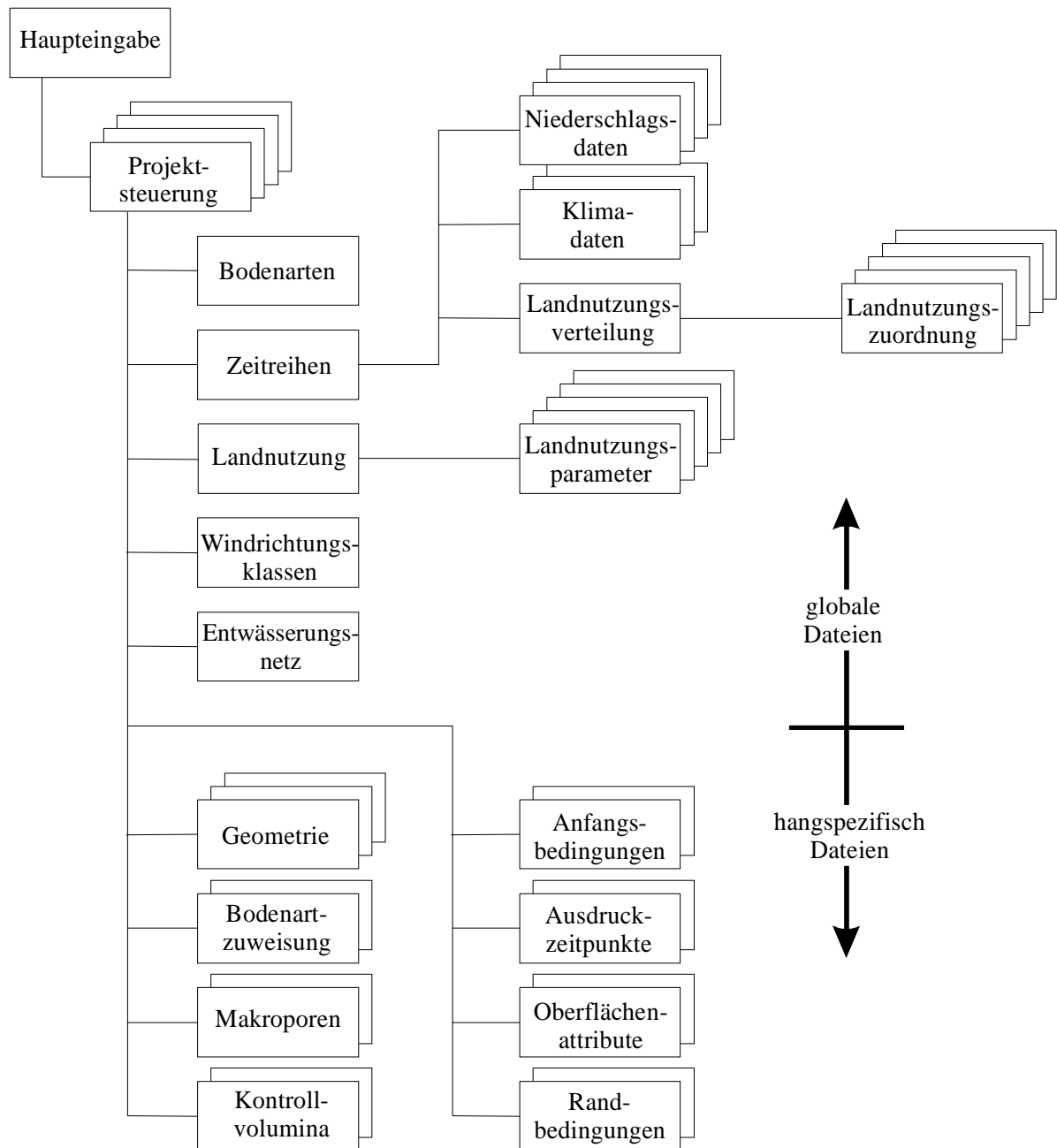


Abb. 4.2: Hierarchie der Eingabedaten im Modellsystem CATFLOW

Bei der Modellierung der Infiltrationsvorgänge in die Makroporen verwendet MAURER (1997) im Prinzip ein von BEVEN & GERMANN (1981b) und GERMANN & BEVEN (1985) vorgestelltes, physikalisch begründetes Infiltrationsmodell. Es basiert wie das CBM auf der Vorstellung von vertikalen Röhren, in denen sich bei Auftreten von Infiltrationsüberschuß der Bodenmatrix ein Makroporenwassergehalt θ_{mak} einstellt. Die Fließgeschwindigkeit des an den Wandungen der Makroporen

herabfließende Wasser q_{mak} ergibt sich aus maximaler Fließgeschwindigkeit b_{mak} und dem Anpassungsparameter a_{mak} mit

$$q_{mak} = b_{mak} \theta_{mak}^{a_{mak}} \quad (4.5)$$

Auf dem Weg entlang der Makroporen in die Tiefe wird ein Teil des Makroporenwassers durch die Wandung von der Bodenmatrix absorbiert (Abb. 4.3). Das Verhältnis der Translationsgeschwindigkeit in die Tiefe q_{mak} und der Absorption durch die Makroporenwandung $q_{mak-mik}$ bestimmt maßgeblich die Wirksamkeit hinsichtlich der Tiefenverlagerung von Wasser und ist von einer Vielzahl unbekannter Faktoren abhängig (insbesondere der Beschaffenheit der Makroporenwandungen).

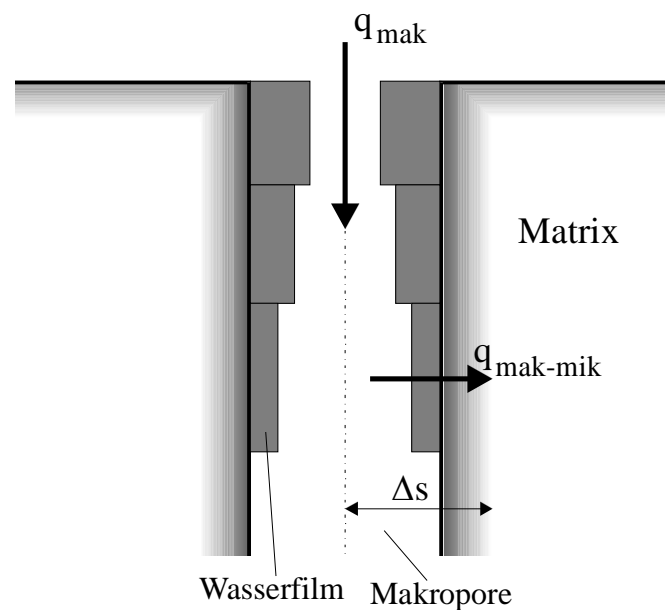


Abb. 4.3: Konzept der Makroporeninfiltration

Die Flußrate aus der Makro- in die Mikroporen $q_{mak-mik}$ wird von BEVEN & GERMANN (1981b) wie folgt berechnet:

$$q_{mak-mik} = \sqrt{K(\theta) \cdot K_s} \frac{\partial \Psi}{\partial s} \quad (4.6)$$

$$= \frac{\sqrt{K(\theta) \cdot K_s}}{C} \frac{\theta_s - \theta}{\Delta s} \quad (4.7)$$

Dabei ist $K(\theta)$ die vom Bodenwassergehalt abhängige, momentane Leitfähigkeit der Bodenmatrix, K_s die gesättigte Leitfähigkeit der Bodenmatrix, $\partial \Psi / \partial s$ der Saugspannungsgradient, C die Wasserkapazität, θ der Wassergehalt, θ_s der Sättigungswassergehalt und Δs die diskrete Wirkungslänge für die Saugspannungsdifferenz.

Prinzipiell ergibt sich durch die Hinzunahme der vertikal differenzierten Makroporeninfiltration eine größere Flexibilität der Tiefenverteilung des infiltrierenden Wassers.

Zur Beschreibung des Makroporenflusses werden in CATFLOW die maximale Fließgeschwindigkeit und der Makroporenwassergehalt als Parameter verwendet. Die Flußrate von den Makroporen in die Mikroporen beschreibt die Interaktion zwischen diesen zwei Domänen.

• Fließmodell QSOIL

Dieses zweidimensionale Finite-Elemente-Modell wurde von ZUIDEMA (1985) entwickelt und von FAEH (1997) verbessert. Es berücksichtigt den Oberflächenabfluß, Matrix- und Makroporenfluß sowie die Interaktion zwischen Matrix und Makroporen.

Da der Oberflächenabfluß als eindimensionaler Schichtfluß betrachtet wird, kann unter Berücksichtigung der Erhaltungssätze für Energie und Masse die hydrodynamische Grundgleichung und die Kontinuitätsgleichung verwendet werden. Da sie in diesem Fall auf den Oberflächenabfluß angewendet werden und Trägheits- und Druckglieder zu vernachlässigen sind, resultiert daraus der Ansatz

der kinematischen Welle. Mittels der MANNIG-STRICKLER-Formel wird die Oberflächenabflußgeschwindigkeit in Abhängigkeit des Gefälles und des hydraulischen Radius berechnet (WEILER, 1997: 18-19).

Der Matrixfluß in einem gesättigten porösen Medium kann mit der Darcy-Gleichung beschrieben werden, wobei der Durchfluß Q für einen bestimmten Querschnitt A abhängig von Gefälle I und dem gesättigten Durchlässigkeitsbeiwert k_{sat} ist:

$$Q = k_{sat} \cdot A \cdot I \quad \Rightarrow \quad v_f = k_{sat} \cdot I = \frac{Q}{A} = v \cdot n_{eff} \quad (4.8)$$

Die im Boden wirkenden Kräfte können auch über das hydraulische Potential Ψ ausgedrückt werden, das sich aus dem Gravitationspotential Ψ_z und dem Matrixpotential Ψ_m zusammensetzt:

$$\Psi = \Psi_z + \Psi_m \quad (4.9)$$

Zur Modellierung des Matrixflusses in vertikaler und horizontaler Richtung, wird in QSOIL die Matrixpotentialform der RICHARDS-Gleichung (JURY ET AL., 1991: 107) verwendet:

$$C(\Psi) \frac{\partial \Psi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial h} \left[K(\Psi) \left(\frac{\partial \Psi}{\partial h} + 1 \right) \right] \quad (4.10)$$

Der Makroporenfluß wird in QSOIL in Abhängigkeit vom Füllungsgrad der Makroporen modelliert. Sind die Makroporen nur teilweise gefüllt, wird der Ansatz der kinematischen Welle verwendet, während bei vollständiger Füllung noch ein Druckglied mit einbezogen werden muß. Aufgrund der Schwierigkeiten bei der Bestimmung des Rauigkeitsbeiwertes in den Makroporen wird die Fließgeschwindigkeit in den Makroporen aus Literaturwerten entnommen und als Modellparameter eingegeben.

Da in QSOIL nur der vertikale Makroporenfluß modelliert wird, muß der Fluß in bevorzugten Fließwegen in horizontaler Richtung zusätzlich auf der Basis der Diffusionswelle simuliert werden. Bei dieser Art von Fließbewegungen wird davon

ausgegangen, daß keine Druckdifferenz zur umliegenden Matrix besteht, sondern der unterschiedliche Durchfluß durch vertikale Unterschiede der Fließ- und Retentionsparameter verursacht wird (WEILER, 1997: 20).

Die Interaktion zwischen Makroporen und Matrix ist abhängig von den hydraulischen Eigenschaften der Matrix sowie von der Wasserversorgung und den strukturellen Eigenschaften der Makroporen. Dabei kommt den Makroporenwandungen eine große Bedeutung zu, da z.B. Regenwurmlöcher mit einem tonigen und somit geringer durchlässigen Material ausgekleidet sind (ZUIDEMA, 1985: 40). Wasser kann sich von den Makroporen in die Matrix oder bei gesättigter Matrix und bei nur teilweise oder nicht gefüllten Makroporen in entgegengesetzter Richtung bewegen (BEVEN & GERMANN, 1982: 1318).

Eine röhrenförmige Makropore kann als langgestreckter Zylinder innerhalb eines Einheitsvolumens betrachtet werden. Die interaktiven Fließbewegungen finden in radialer Richtung statt und sind durch die eindimensionale Form der RICHARDS-Gleichung numerisch berechenbar. Eine weniger rechenintensive Methode stellt die Abschätzung des Interaktionsflusses, wie sie bei Faeh (1997) beschrieben ist, dar. Dabei wird der Fluß zwischen Makroporen und Matrix in Abhängigkeit vom Durchmesser d der Makroporen, dem radialen Einflußbereich der Makropore im Einheitsvolumen b , den Durchlässigkeitsbeiwerten der Bodenmatrix k und der Makroporenwandung k_l , der Dicke der Makroporenwandung x_l und der Druckhöhe der Bodenmatrix h und der Makropore h_m berechnet:

$$q_i = 2\pi \left(\frac{d}{2} + \frac{x_e}{2} \right) n_\Phi k_l \frac{\Delta h}{x_e} \quad (4.11)$$

mit

$$n_\Phi = \frac{1}{\pi b^2} \quad \text{und} \quad b = \sqrt{\frac{d^2}{4n_{mak}}} \quad (4.12; 4.13)$$

und

$$x_e = x_l + \frac{\left(\frac{d}{2} - b - x_l \right) \frac{k_l}{k}}{4 + 2\sqrt[4]{h_m}} \quad (4.14)$$

und

$$\Delta h = h_m - h \quad ; \quad \text{wenn } h \geq -0,05m \quad (4.15)$$

$$\Delta h = h_m - (-0,05) \quad ; \quad \text{wenn } h < -0,05m \quad (4.16)$$

Der berechnete Interaktionsfluß pro Einheitsvolumen q_i wird als Interaktionsmatrix in Abhängigkeit von h und h_m direkt in QSOIL eingegeben (WEILER, 1997: 20-21).

Auch für QSOIL sind die Parameter, welche die Makroporen beschreiben, schwer zu bestimmen. Fließgeschwindigkeiten in Makroporen, Makroporosität und Porendurchmesser werden aus Geländebeobachtungen oder Literaturwerten abgeschätzt. Für die Interaktionsparameter, also Durchlässigkeitsbeiwert der Makroporenwandungen und die Wandstärke, sind kaum Daten aus der Literatur bekannt. (WEILER, 1997: 20-21)

4.3 Fazit

Die heute sehr leistungsfähigen Computer erlauben eine sehr differenzierte Berechnung der Fließvorgänge in der ungesättigten Zone unter Einbeziehung vieler Details. Die dennoch oft großen Unterschiede zwischen beobachteten und simulierten Fließprozessen lassen sich in erster Linie auf die schlechten Möglichkeiten zur Bestimmung, der bei diesen Modellen verwendeten Parameter, zurückführen. Die in den jeweiligen Modellen benötigten Parameter zur Modellierung des Makroporenflusses sind ohne Ausnahme schwer zu bestimmen. Für den im CBM verwendeten Torsionsfaktor, als auch für die in QSOIL verwendeten Parameter zur Beschreibung der Beschaffenheit der Makroporenwände sind kaum Informationen vorhanden, so daß diese Parameter zur Anpassung der Modelle verwendet werden. Dies zeigt den großen Bedarf an neuen Möglichkeiten zur Gewinnung von Informationen über die Domäne der Makroporen besonders deutlich.

5 Schlußfolgerungen

Die im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Technik bietet durch ihre Multifunktionalität besonders in Verbindung mit der Markierungstechnik zahlreiche Möglichkeiten, um wertvolle Informationen für die Modellierung von Makroporenfluß zu gewinnen (Tab. 5.1). Da der Boden ständig von Mensch, Tier, Pflanze und anderen Faktoren beeinflusst wird, unterliegt das Mikro- und Makroporensystem einer ständigen Veränderung, das sich in einer großen räumlichen und zeitlichen Variabilität äußert. Um diese Veränderungen für die Modellierung erfassen zu können, ist es notwendig, möglichst viele Untersuchungen durchzuführen, die räumlich und zeitlich weit gestreut sind. Die einfache Handhabung der neuen Technik bietet dafür gute Voraussetzungen, weil sie schnell und unmittelbar Ergebnisse liefern kann. Eine Einschränkung besteht dahingehend, daß wegen des Endoskopdurchmessers nur größere Makroporen über 3 mm Durchmesser untersucht werden können.

Tab. 5.1: Makroporenparameter und potentielle Bestimmungsmöglichkeiten mittels Endoskopietechnik

Parameter	Bestimmungsmöglichkeit	Verwendet in ...	potentielle Bestimmungsmöglichk. m. Endoskopietechnik
Fließgeschwindigkeit in den Makroporen	Mittelwerte aus Literatur	QSOIL	tracermethodisch erfaßbar
Makroporosität	Abschätzung oder Ermittlung sichtbarer Makroporen durch Beobachtung	QSOIL HILLFLOW TBM	nicht erfaßbar
Durchmesser einer Makropore (Röhre)	Abschätzung aus Geländebeobachtungen und Literaturwerten	QSOIL CBM	visuell erfaßbar
Halbe Kluftweite		QSOIL	
Durchlässigkeitsbeiwert		QSOIL	tracermethodisch

der Makroporenwandung	Kaum Daten aus der Literatur,		erfaßbar
Stärke der Makroporenwandung	nicht direkt meßbar	QSOIL	visuell erfaßbar
Anzahl der kapillaren Röhren mit bestimmten Durchmesser	Abschätzung oder Ermittlung sichtbarer Makroporen durch Beobachtung	CBM	nicht erfaßbar
Torsionsfaktor	Anpassungsparameter	CBM	bedingt visuell erfaßbar
Maximal mögliche Fließgeschwindigkeit in der Makropore	Abschätzung und Literaturwerte	CATFLOW	tracermethodisch erfaßbar
Makroporen-wassergehalt	Abschätzung	CATFLOW TBM, KWM	visuell erfaßbar
Flußrate von der Matrix in die Makroporen		TBM	tracermethodisch erfaßbar
Flußrate von den Makroporen in die Matrix	Abschätzung	CATFLOW TBM	tracermethodisch erfaßbar
Infiltrationsrate der Makroporen		HILLFLOW	tracermethodisch erfaßbar
Mächtigkeit der Makroporenschicht	Abschätzung aus Geländebeobachtungen	HILLFLOW TBM	visuell erfaßbar
radiale Infiltration	Abschätzung	RZWQM	tracermethodisch erfaßbar

Dabei soll jedoch nicht der Eindruck erweckt werden, daß alle offenen Fragen bezüglich der Makroporendomäne ohne Einschränkung mittels dieser Technik zu beantworten sind. Die Erwartungen bestehen eher darin, daß die Endoskopie einen Beitrag liefern kann, die mit anderen Mitteln erworbenen Kenntnisse über die Fließvorgänge in der ungesättigten Zone wertvoll zu ergänzen. Selbst wenn nicht alle eventuell auftretenden Schwierigkeiten vorbehaltlos gelöst werden können, ist

dank der großen potentiellen Möglichkeiten auch ein eingeschränkter Gebrauch dieser neuen Technik in Labor und Gelände von beachtlichem Nutzen.

Wie auch immer die auf dieser Arbeit basierenden weiteren Entwicklungen der Endoskopiertechnik verlaufen werden, trifft folgendes auf jeden Fall zu. Um tiefere Kenntnisse über die Fließvorgänge in den Makroporen und deren Interaktionen mit der Matrix zu erhalten, ist es unbedingt notwendig alle zur Verfügung stehenden Möglichkeiten auszuschöpfen. Deshalb kann auf eine interdisziplinäre Erforschung unter Einbeziehung der Hydrologie, Geologie, Bodenkunde, Zoologie, Botanik, usw. kaum verzichtet werden, wenn das Ziel verfolgt werden soll, die Fließvorgänge der ungesättigten Zone auch nur annähernd zufriedenstellend zu klären.

6 Literaturverzeichnis

- AHUJA, L. R., JOHNSEN, E. UND HEATHMAN G. C. (1995): Macropore Transport of a Surface-Applied Bromide Tracer: Model Evaluation and Refinement. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 59, 1234 - 1241
- BARCZEWSKI, B. (1988): Entwicklung eines Lichtleiterfluorometers zur Untersuchung von Transport- und Vermischungsvorgängen in Strömungen. Aus: Proceedings AMA-Seminar „Faser- und Integriert-Optische Sensoren“, Heidelberg, 267-281
- BEASLEY, R. S. (1976): Contribution of Subsurface Flow from the Upper Slopes of Forested Watersheds to Channel Flow. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 40, 955 - 957
- BEVEN K. & GERMANN P. (1981a): Waterflow in Soil Macropores I. An Experimental Approach. *Soil Science*, 32, 1 - 13
- BEVEN K. & GERMANN P. (1981b): Waterflow in Soil Macropores II. An Experimental Approach. *Soil Science*, 32, 15 - 29
- BEVEN K. & GERMANN P. (1982): Macropores and Water Flow in Soils. *Water Resources Research*, 18, 1311 - 1325
- BRONSTERT A. & PLATE E. J. (1997): Modelling of Runoff Generation and Soil Moisture Dynamics for Hillslopes and Micro-Catchments. *Journal of Hydrology*, 198, 177 - 195
- CHEN C., WAGENET R.J. (1992): Simulation of Water and Chemicals in Macropore Soils. Part 1. Representation of the Equivalent Macropore Influence and its Effect on Soilwater Flow. *Journal of Hydrology*, 130, 105 - 126
- CHEN C., THOMAS D. M., GREEN R. E., WAGENET R.J. (1993): Two-Domain Estimation of Hydraulic Properties in Macropore Soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 57, 680 - 686

- CHILDS E. C., COLLIS-GEORGE N., HOLMES J. W. (1957): Permeability Measurements in the Field as an Assessment of Anisotropy and Structure Development. *Journal of Soil Science*, 8(1), 27 - 41
- DI PIETRO, L. & LAFOLIE, F. (1991): Water flow characterisation and test of a kinematic-wave model for macropore flow in a highly contrasted and irregular double-porosity medium. *J. of Soil science*, 42, 551 - 563.
- EMERMAN S. H. (1995): The Tipping Bucket Equations as a Model for Macropore Flow. *Journal of Hydrology*, 171, 23 - 47
- FAEH, A. (1997): Understanding the Processes of Discharge Formation under Extreme Precipitation. *Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich*, Nr. 150, 197
- GERMANN, P. UND BEVEN, K. (1985): Kinematic Wave Approximation to Infiltration into Soils with Sorbing Macropores. *Water Resources Research* 21(7), 990-996
- GERTHSEN, CH., KNESER H., VOGEL H. (1989): *Physik*. Springer Verlag, New York, 920
- GILMAN, K. & NEWSON M. (1980): *Soil Pipes and Pipe Flow – A Hydrological Study in Upland Wales*. British Geomorphological Research Group, Geobooks, Norwich U.K., 110.
- GREEN R. D. UND ASKEY G. P. (1965): Observations on the Biological Development of Macropores in Soils of Romney Marsh. *Journal of Soil Science*, 16(2), 342
- GREEN R. E. UND COREY J. C. (1971): Calculation of Hydraulic Conductivity: A Further Evaluation of Predictive Methods. *Soil Soc. Sci. Am. Proc.*, 35, 3 - 8

-
- HARTGE H. K., HORN R. (1991): Einführung in die Bodenphysik. Enke Verlag, Stuttgart, 250
- HOLE F. D. (1981): Effects of Animals on Soils, Geoderma, 25, 75 - 112
- HUBMANN H. (1992): Lichtwellenleiter-Praxis. Einführung, praktische Anwendung, Meßtechnik. Franzis Verlag, München, 187
- HURSH, C. R. (1944): Report of the Subcommittee on Subsurface Flow, Eos Trans. AGU, 25, 743-746
- JACKSON R. D. (1972): On the Calculation of Hydraulic Conductivity. Soil Soc. Sci. Am. Proc. 35, 380 - 383
- JURY W. A., GARDNER W. R., GARDNER W. H. (1991): Soil Physics. John Wiley & Sons, New York, 328
- KÄSS W. (1992): Lehrbuch der Hydrologie. Geohydrologische Markierungstechnik. Borntträger Verlag, Berlin, 519
- KUNTZE H., ROESCHMANN G., SCHERDTFEGER G. (1994): Bodenkunde. Ulmer Verlag, Stuttgart, 424
- LAWES, J. B., GILBERT, J. H., WARINGTON, R. (1882): On the Amount and Composition of the Rain and Drainage Water Collected at Rothamsted, Williams, Clowes and Sons Ltd., London, 178
- LAMPARSKI F. (1985): Der Regenwurm Lumbricus badensis - seine Wohnröhre, seine Verbreitung und sein Einfluß auf die Böden im Südschwarzwald. Diss., Freiburg, 327

- LEIBUNDGUT, C. & WEINGARTNER, R. (1982): Tracermethoden in der Hydrologie. Kümmerly + Frey Verlag, Bern, 236
- MAURER, T. (1997): Physikalisch begründete, zeitkontinuierliche Modellierung des Wassertransports in kleinen ländlichen Einzugsgebieten. IHW, Universität Karlsruhe, Heft 61, 238
- MCDONNELL, J. J. (1990): A Rationale for Old Water Discharge through Macropores in a Steep, Humid Catchment. *Water resources research*, 26 (11), 2821 - 2832
- OGDEN, C. B., WAGENET, R. J., VAN ES, H. M., HUTSON, J. L. (1992): Quantification and Modeling of Macropore Drainage. *Geoderma*, 55, 17 - 35
- PEYTON, R. L., GANTZER, C. J., ANDERSON, S. H., HAEFFNER, B. A., PFEIFER, P. (1994): Fractal Dimension to Describe Soil Macropore Structure Using X-Ray Computed Tomography, *Water Resources Research*, 30, 691–700
- REHLING, J. (1997): Industrielle Endoskopie. Moderne Industrie Verlag, Landsberg/Lech, 70
- RINGHARDTZ, J. (1981): Einführung in die Fluoreszenz-Spektroskopie. Aus: *Angewandte UV-Spektroskopie Heft 4*, 1-37
- SINGH, P., KANWAR, R. S., THOMPSON, M. L. (1991): Macropore Characterization for Tillage Systems Using Resin-Impregnation Technique. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 55, 1674-1679
- SCHACHTSCHABEL, P., BLUME, H. P., BRÜMMER, G., HARTGE, K. H., SCHWERTMANN, U. (1989): *Lehrbuch der Bodenkunde*. Enke Verlag, Stuttgart, 468
- SCHULMANN, S. (1977): *Fluorescence and Phosphorescence Spectroscopy*. Pergamon Verlag, Oxford,

SCHUMACHER, W. (1864): Die Physik des Bodens. Berlin

STORZ KARL GMBH & CO. (1996): Karl Storz Endoskope. Technische Endoskopie.
Produktkatalog. Tuttlingen

WEILER, M. (1997): Untersuchungen zur Abflußbildung an Hängen mit
Tracerversuchen und numerischer Modellierung der Wasserbewegung.
Diplomarbeit, Freiburg, 147

ZUIDEMA, P. K. (1985): Hydraulik der Abflussbildung während Starkniederschlägen.
Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie,
Nr. 79, Zürich, 150

Ehrenwörtliche Erklärung:

Hiermit erkläre ich, daß die vorliegende Arbeit selbständig und nur unter Verwendung der angegebenen Hilfsmittel angefertigt wurde.

Freiburg, 28.04.98