

**Zeitschrift:** Schweizerische Zeitschrift für Vermessung, Kulturtechnik und Photogrammetrie = Revue technique suisse des mensurations, du génie rural et de la photogrammétrie

**Herausgeber:** Schweizerischer Verein für Vermessungswesen und Kulturtechnik = Société suisse de la mensuration et du génie rural

**Band:** 63 (1965)

**Heft:** 2

**Artikel:** Sickerströmung im Grundwasserbereich und Kapillarsaum

**Autor:** Lecher, Kurt

**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-219975>

### 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:** 06.01.2026

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

# Schweizerische Zeitschrift für Vermessung, Kulturtechnik und Photogrammetrie

Revue technique Suisse des Mensurations, du Génie rural et de Photogrammétrie

Herausgeber: Schweiz. Verein für Vermessungs-  
wesen und Kulturtechnik; Schweiz. Kulturingenieurverein;  
Schweiz. Gesellschaft für Photogrammetrie

Editeur: Société suisse des Mensurations et Amélio-  
rations foncières; Société suisse des Ingénieurs du  
Génie rural; Société suisse de Photogrammétrie

Nr. 2 • LXIII. Jahrgang

Erscheint monatlich

15. Februar 1965

## Sickerströmung im Grundwasserbereich und Kapillarsaum<sup>1</sup>

*Dr. sc. techn. Kurt Lecher, Hannover*

### Zusammenfassung

Das Bodenwasser kann nach dem Spannungszustand und den Kraftwirkungen unterteilt werden in:

1. Grund- und Sickerwasser
2. Kapillarwasser
3. Adsorptionswasser

Das Filtergesetz von Darcy bildet die Grundlage aller theoretischen Betrachtungen über die Strömung des Grund- und Kapillarwassers. Die Durchlässigkeit des Bodenmaterials wird dabei durch den  $k_f$ -Wert charakterisiert. Dieser Wert kann durch verschiedene Verfahren (Berechnung, Labor- und Feldversuch) bestimmt werden. Die Feldversuche (nach Hooghoudt-Ernst im Bereich unterhalb des Grundwasserspiegels) liefern die besten Ergebnisse. Derzeit wird versucht, eine brauchbare Feldmethode zur Bestimmung des  $k_f$ -Wertes über dem Grundwasserspiegel zu entwickeln. Dabei sind die Strömungsversuche im ungesättigten Bereich wesentlich zu beachten.

Über die Kapillarität und Sickerströmung in ungesättigten, nicht-bindigen Böden wurden vom Institut für Kulturtechnik der Eidgenössischen Technischen Hochschule, Zürich, umfangreiche Untersuchungen durchgeführt. Diese zeigten, daß die Sickerströmung im Kapillarsaum bei der Beurteilung der Wasserbewegung im Boden unbedingt berücksichtigt werden muß und daß sie über die Bestimmung der kapillaren Durchlässigkeit rechnerisch erfaßt werden kann.

### Résumé

Suivant l'état de contrainte et l'effet dynamique des eaux souterraines on distingue:

- 1<sup>o</sup> l'eau de gravité
- 2<sup>o</sup> l'eau capillaire
- 3<sup>o</sup> l'eau pelliculaire

<sup>1</sup> Die vorliegende Arbeit bringt Ergebnisse einer Untersuchung, welche am Institut für Kulturtechnik der ETH mit Unterstützung des Jubiläumsfonds 1930 ausgeführt und als Dissertation 1964 vorgelegt werden konnte.

La loi de Darcy sert de base à toutes les considérations théoriques concernant l'eau de gravité et l'eau capillaire. La conductivité hydraulique du sol est caractérisée par la valeur  $k_f$ . Celle-ci peut être déterminée selon différentes méthodes (par calcul ou par des essais en laboratoire et sur le terrain). Les meilleurs résultats sont obtenus par des essais sur le terrain (d'après Hooghoudt-Ernst sous le niveau de la nappe phréatique). Actuellement on essaie de développer une méthode utilisable pour déterminer la valeur  $k_f$  au-dessus de la nappe phréatique. Pour cela il est nécessaire de tenir compte des courants en milieu non saturé.

L'auteur a exécuté à l'Institut de Génie Rural de l'Ecole Polytechnique Fédérale à Zurich des recherches étendues sur la capillarité et les courants de filtration dans les sols poreux non saturés et sans cohésion. Ces recherches ont démontré l'importance des mouvements de l'eau dans la zone capillaire et la possibilité de calculer ces mouvements par la détermination de la conductivité capillaire.

### 1. Das Wasser im Boden

Das von oben in den Boden eindringende Wasser wird zum Teil durch die im Boden vorhandenen Hohlräume zum Grundwasser abfließen, zum anderen Teil aber von den im Boden wirksamen Sorptionskräften zurückgehalten und gespeichert. Nach dem Spannungszustand und den Kraftwirkungen unterteilen wir das Bodenwasser in:

- a) *Grund- und Sickerwasser* unterliegt hauptsächlich dem Einfluß der Schwerkraft. Sein Bewegungsverhalten wird durch die Durchlässigkeit gekennzeichnet.
- b) Das *Kapillarwasser* wird durch die Oberflächen- beziehungsweise Grenzflächenkräfte der Flüssigkeit und die Adhäsionskräfte von Flüssigkeit und Feststoff entgegen der Schwerkraft im Boden gehalten und steht unter Saugspannung. Sein Fließverhalten wird vorwiegend durch die Kapillarkräfte bestimmt.
- c) Das *Adsorptionswasser* wird durch elektroosmotische Oberflächenkräfte der festen Bodensubstanz stark an die Bodenpartikel gebunden und ist nur durch Anwendung hoher Spannung zu entfernen.

### 2. Strömung im gesättigten Boden

Die Grundlage aller theoretischen Betrachtungen über die Grundwasserströmung bildet das Filtergesetz von Darcy. Es befaßt sich mit der Filtergeschwindigkeit ( $v_f$ ) von Flüssigkeiten durch ein poröses Material unter der Wirkung eines Gefälles  $i$ . Nach Darcy ist die Filtergeschwindigkeit  $v_f$  direkt proportional zu  $i$ , wobei der Einsatz einer allgemeinen Proportionalitätskonstanten  $k$  mit der Dimension Zentimeter pro Sekunde zur folgenden Gleichung führt:

$$v_f = k_f \cdot i = k_f \cdot \frac{\Delta h}{\Delta l}$$

Diese Filtergeschwindigkeit stellt eine fiktive Geschwindigkeit dar, die aus der Durchflußmenge und dem gesamten Querschnitt der Probe

(Poren- und Feststoffquerschnitt) errechnet wird und somit in einem Versuch nicht direkt gemessen werden kann. Die Proportionalitätskonstante  $k_f$ , allgemein als Durchlässigkeit angegeben, stellt die Filtergeschwindigkeit bei einem Gefälle  $i = 1$  dar; das heißt, die Druckdifferenz entspricht der Länge des durchströmten Bodens.

Für den  $k_f$ -Wert werden folgende Dimensionen verwendet: m/Tag, m/h, m/s, cm/min und cm/s. Als Begründung für die Dimension m/Tag wird oft angeführt, daß diese Dimension anschaulicher sei. Diese Anschaulichkeit führt jedoch leicht zur Fehleinschätzung der effektiv im Boden vorhandenen Grundwassergeschwindigkeit. Die tatsächliche Grundwasserströmung erfolgt im Bereich des sogenannten nutzbaren Porenvolumens. Die auf das gesamte Bodenvolumen (Feststoffvolumen und gesamtes Porenvolumen) bezogene Filtergeschwindigkeit ergibt somit kleinere Werte. Des weiteren finden wir bei Grundwasserströmungen in der Natur kaum ein Gefälle von  $i = 1$ .

Der Proportionalitätsfaktor  $k_f$  wird allgemein als praktischer Ausdruck zur Darstellung der Durchlässigkeit des Bodens in bezug auf Wasser verwendet. Für ein poröses Medium hängt der  $k_f$ -Wert sowohl von der Natur des Mediums als auch von den physikalischen Eigenschaften des Wassers ab. In der Erdölindustrie, wo mit Flüssigkeiten verschiedenster Viskosität gearbeitet wird, verwendet man daher die sogenannte «intrinsic permeability» (absolute Durchlässigkeit)  $k_{00}$  zur Charakterisierung eines vom benutzten Fluidum unabhängigen Wertes.

Die Umrechnung von  $k_f$  auf  $k_{00}$  kann erfolgen mit:

$$k_{00} = \frac{\eta}{\gamma_w} \cdot k_f$$

$k_{00}$  Absolute Durchlässigkeit ( $\text{cm}^2$ )

$k_f$  Durchlässigkeit für Wasser bei voller Sättigung ( $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ )

$\eta$  Dynamische Viskosität des Wassers ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ )

$\gamma_w$  Spezifisches Gewicht des Wassers ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-2}$ )

Statt in Quadratzentimetern wird die absolute Durchlässigkeit auch oft in Quadratkilometern ( $\mu^2$ ) ( $1 \mu^2 = 1 \text{ Darcy} = 10^{-8} \text{ cm}^2$ ) angegeben.

Die  $k_f$ -Wert-Bestimmung kann auf verschiedene Weise erfolgen:

1. Berechnung aus der Kornverteilung des Bodens
2. Durch Laboruntersuchung
3. Durch Felduntersuchung

### 1. Berechnung aus der Kornverteilung des Bodens

Es wurden dafür verschiedene Formeln aufgestellt, so unter anderen von Seelheim, Hazen, Slichter, Krüger, Terzaghi, Kozeny und Carman. Ihre Anwendung kommt nur bei gleichkörnigem, nichtbindigem Boden-

material in Betracht. Tabelle 1 zeigt, daß die verschiedenen Formeln zur Berechnung der Durchlässigkeit auch bei gleichkörnigen Sanden nur ganz grobe Näherungswerte liefern.

*Tabelle 1:  $k_f$ -Werte von vier Sanden unterschiedlicher Korngröße bei 10 °C in Zentimetern pro Sekunde nach eigenen Messungen und vergleichsweiser Berechnung nach verschiedenen Formeln (Lecher, 1964)*

Sand	<i>M</i>	<i>L</i>	<i>J</i>	<i>K</i>
Nach eigenen Versuchen	$5,63 \cdot 10^{-1}$	$1,59 \cdot 10^{-1}$	$1,01 \cdot 10^{-1}$	$5,02 \cdot 10^{-2}$
Seelheim	$1,604 \cdot 10^{-1}$	$3,41 \cdot 10^{-2}$	$1,16 \cdot 10^{-2}$	$5,14 \cdot 10^{-3}$
Hazen	$2,05 \cdot 10^{-1}$	$4,63 \cdot 10^{-2}$	$1,67 \cdot 10^{-2}$	$7,42 \cdot 10^{-3}$
Slichter	$8,50 \cdot 10^{-2}$	$2,27 \cdot 10^{-2}$	—	—
Krüger	$8,50 \cdot 10^{-2}$	$2,73 \cdot 10^{-2}$	$9,82 \cdot 10^{-3}$	$6,38 \cdot 10^{-3}$
Terzaghi	$1,067 \cdot 10^{-1}$	$3,26 \cdot 10^{-2}$	$1,99 \cdot 10^{-2}$	$1,27 \cdot 10^{-2}$
Kozeny	$6,80 \cdot 10^{-1}$	$2,27 \cdot 10^{-1}$	$2,62 \cdot 10^{-1}$	$1,74 \cdot 10^{-1}$
Kozeny-Carman	$3,44 \cdot 10^{-3}$	$1,59 \cdot 10^{-3}$	$1,018 \cdot 10^{-3}$	$1,204 \cdot 10^{-3}$

## 2. Bestimmung des $k_f$ -Wertes im Labor

Im Labor können die Messungen an *gestörten* und *ungestörten Proben* durchgeführt werden. Zu den Messungen an gestörten Bodenproben wird das Bodenmaterial in ein Versuchsgerät eingeschüttelt, eingestampft, eingerüttelt oder eingeschlämmt. Die mit Stechzylindern oder ähnlichem gewonnenen ungestörten Bodenproben ergeben nur bei einer großen Anzahl von Parallelversuchen repräsentative Ergebnisse. In einzelnen Proben vorhandene Wurmlöcher oder Störungen an der Zylinderwand beeinflussen hier die Meßergebnisse sehr stark. Quellfähiges Material, dessen natürliche Wasseraufnahmefähigkeit von der Auflast abhängt, kann eine Belastung des Probebodens während der Versuche erforderlich machen, so daß wir zwischen Versuchen *ohne* und *mit Belastung der Probe* (letzteres im Ödometer) unterscheiden.

Des weiteren kommt bei bindigen und nichtbindigen Böden eine unterschiedliche Meßtechnik in Anwendung. Bindige Böden mit einer geringen Durchlässigkeit ergeben über einen längeren Zeitraum nur eine geringe Durchflußmenge. Bei diesen Böden kann das Verfahren mit *fallender Druckhöhe* (Kozeny, 1953) angewendet werden, das nach Massing (1964) bereits nach kurzer Zeit einen konstanten Wert liefert. Bei nichtbindigen Böden (Sanden, Kiese) würde die vorhandene begrenzte Wassermenge in kurzer Zeit durchfließen. Es ist daher erforderlich, größere Wassermengen durchfließen zu lassen und den Zulaufwasserspiegel

über ein Niveaugefäß konstant zu halten. Diese Methode ist als Verfahren mit *konstanter Druckhöhe* bekannt. Der  $k_f$ -Wert berechnet sich aus:

$$k_f = \frac{Q}{F \cdot i} = \frac{Q}{F} \cdot \frac{\Delta l}{\Delta h}$$

$k_f$  Durchlässigkeit (cm/s)

$Q$  In der Zeiteinheit (s) durchflossene Wassermenge (cm<sup>3</sup>)

$i$  Gefälle  $i$  (dimensionslos)

$F$  Durchflossener Querschnitt (cm<sup>2</sup>)

$\Delta l$  Durchflossene Probenlänge (cm)

$\Delta h$  Druckhöhendifferenz (cm WS)

### 3. Bestimmung der $k_f$ -Werte durch Feldversuche

Im Feld kann der  $k_f$ -Wert bestimmt werden:

- a) Durch Pumpversuch
- b) Nach der Bohrlochmethode
- c) Nach der Versickerungsmethode
- d) Nach Strömungsmethoden

#### a) Pumpversuch

Der Pumpversuch stellt das älteste Verfahren dar und wird vorwiegend zur Bestimmung der Brunnenergiebigkeit bei Wasserversorgungsanlagen verwendet. Es werden dabei verschiedene Wassermengen jeweils so lange abgepumpt, bis sich der Wasserspiegel nicht mehr weiter absenkt (Beharrungszustand).

#### b) Bohrlochmethode

Diese Methode wurde wesentlich von Diserens (1934) und Hooghoudt und Ernst (1950) entwickelt. Im Gegensatz zum Dauerpumpversuch wird bei der Bohrlochmethode aus der Wasserspiegel-Anstiegs geschwindigkeit in einem Bohrloch unterhalb des Grundwasserspiegels der  $k_f$ -Wert berechnet. Die Bestimmung der Felddurchlässigkeit nach Hooghoudt-Ernst wird für die Drainabstandsbestimmung bereits häufig verwendet, da sie bei wenigen Einzelmessungen repräsentative Werte liefert und nicht so viel Zeit- und Materialaufwand wie ein Pumpversuch benötigt. Dieses Verfahren ist jedoch auf den Bereich unterhalb des Grundwasserspiegels beschränkt. Bei der Melioration von Böden, die nur zeitweilig einer Regelung des Wasserhaushaltes durch Drainage bedürfen, ist die Bohrlochmethode durch eventuell vorhandene tiefe Grundwasserstände zum Zeitpunkt der Messung wegen des eingeschränkten Meßbereiches in Frage gestellt. Für die Bewässerung in unserem Klimabereich beziehungsweise bei der kombinierten Be- und Entwässerung der versalzungsgefährdeten Böden in den ariden Zonen kann der  $k_f$ -Wert nicht mit dieser Methode bestimmt werden. Darüber hinaus erfordern  $k_f$ -Wertmessungen mit Hilfe der Bohrlochmethode theoretische Kenntnisse und praktische Erfahrung, da bei Nichtbeachtung der hydraulischen

Grenzbedingungen fehlerhafte Resultate zu erwarten sind. So darf zum Beispiel bei Vorhandensein von gespanntem Grundwasser (Druckwasser) die Bohrlochmethode nach Hooghoudt-Ernst nicht verwendet werden.

c) *Versickerungsmethode*

Seit Beginn der Entwicklung der Bohrlochmethode wird versucht, den  $k_f$ -Wert auch über dem Grundwasserspiegel durch Feldversuche bestimmen zu können. Bereits Burger (1922) von der Eidgenössischen Anstalt für das forstliche Versuchswesen verglich die Versickerungsmengen verschiedener Waldböden und erhielt damit Vergleichswerte dieser Böden. Speziell mit der  $k_f$ -Wertbestimmung durch Versickerung von Wasser in den Boden befaßten sich Blanc (1938), Khafagi (1944) am Institut für Kulturtechnik der ETH, Ceçen (1959) und Bouwer (1964). Angeregt durch das Interesse an einer praktischen Feldmethode, laufen derzeit am Institut für Wasserwirtschaft und landwirtschaftlichen Wasserbau der TH Hannover (Mühlbauer, 1964) systematische Untersuchungen in dieser Richtung.

d) *Strömungsmethoden*

Eine weitere Möglichkeit zur Bestimmung der Durchlässigkeit im Feld stellen die sogenannten Strömungsmethoden dar, wobei über die Messung der tatsächlichen Strömungsgeschwindigkeit mit Salzen, Farbstoff oder Isotopen und dem nutzbaren Porenvolumen der  $k_f$ -Wert gefunden werden kann. Außerdem wird versucht, ähnlich wie in stark turbulenten offenen Gewässern, nach dem «Verdünnungsverfahren» (Veränderung der Salzkonzentration oder der Aktivität) die Durchlässigkeit festzustellen. Ein besonderer Vorteil bei der Verwendung von radioaktiven Substanzen besteht darin, daß es möglich ist, für die Injektion und die Messung der Aktivitätsabnahme – als Funktion der Filtergeschwindigkeit – mit einem einzigen Bohrloch auszukommen. Der größere apparative Aufwand darf jedoch nicht übersehen werden.

*Gültigkeit des Darcyschen Gesetzes*

Als obere Grenze der Gültigkeit des lineären Sickergesetzes nach Darcy werden von den verschiedenen Autoren im allgemeinen Reynoldsche Zahlen zwischen  $Re = 4$  und  $Re = 5$  angenommen; mit

$$Re = \frac{v_f \cdot d_m}{\nu} .$$

$v_f$  Filtergeschwindigkeit (cm/s)

$d_m$  Mittlerer Korndurchmesser (cm)

$\nu$  Kinematische Viskosität (cm<sup>2</sup>/s)

Die untere Grenze für die Anwendbarkeit des Darcy-Gesetzes ist durch die rheologischen<sup>1</sup> Eigenschaften der Hülle an gebundenem Wasser um das Bodenkorn bestimmt.

<sup>1</sup> Rheologie oder Fließlehre beschreibt die Mechanik der deformierbaren Stoffe

### 3. Strömung im ungesättigten Boden

Reicht die Flüssigkeitsmenge zur Füllung aller Bodenhohlräume nicht aus, so daß Gas (Luft) oder Wasserdampf die restlichen Hohlräume füllt, spricht man vom ungesättigten System. Aus dem Zweiphasensystem (feste Bodenteilchen, Wasser) wird ein Dreiphasensystem (Boden, Wasser, Luft), und aus der Filterströmung wird eine Strömung im ungesättigten System. In diesem Dreiphasensystem besteht theoretisch die Möglichkeit sowohl einer Ein- als auch einer Zweiphasenströmung.

Im Kapillarsaum unserer Kulturböden strömt im allgemeinen nur die flüssige Phase Wasser. Lediglich durch ein Steigen oder Fallen des Grundwasserspiegels ergibt sich eine gewisse vertikale Gas- (Luft-) Bewegung. Eine Mehrphasenströmung finden wir dann im Boden, wenn andere Flüssigkeiten als Wasser (zum Beispiel Öl, Benzin) in den Grundwasserbereich gelangen.

Zwischen dem durchschnittlichen Wassergehalt und der Größe des Durchflußquerschnittes einerseits und der Saugspannung anderseits besteht ein enger Zusammenhang. Würden im stationären Fließzustand die luftfüllten Hohlräume durch Mineralkörner ersetzt, so ändert das, unter Vernachlässigung der Reibung, an den Durchflußverhältnissen nichts. Die Verminderung des Durchflußquerschnittes ergibt eine geringere Durchlässigkeit. Mit abnehmender Sättigung wird somit der Durchflußquerschnitt und die Durchlässigkeit kleiner. Diese Durchlässigkeitsabnahme erfolgt bei feineren Sanden rascher als bei gröberen, da die feineren Poren schon bei geringem Luftgehalt verstopft werden.

Wir vergleichen somit die Strömung in einem System, bei dem die luftfüllten Hohlräume durch Mineralkörner ersetzt wurden. Mit dieser Annahme erhalten wir aus dem ungesättigten Medium ein gesättigtes Medium mit kleinerem Durchflußquerschnitt. Entsprechend der oben angeführten Abhängigkeit zwischen Wassergehalt und Saugspannung bleibt  $k$  nicht mehr konstant, sondern wird eine Funktion des Wassergehaltes und damit der Saugspannung.

Zur Untersuchung der Sickerströmung im Kapillarsaum wurden vom Institut für Kulturtechnik der ETH (Lecher, 1964) umfangreiche Versuche durchgeführt. Abbildung 1 zeigt einen Teil der Versuchsrinne mit dem Strömungsbild von Versuch 8 (Sand K, 2% Gefälle).

Die Versuchsrinne erlaubte, ein Gefälle von 0 bis 45 % einzustellen. Als Versuchsmaterial dienten vier Quarzsande mit kapillaren Steighöhen nach 10 Tagen von 19,5, 29,0, 42,5 und 64,0 cm. Der bei Versuch 8 (Abb. 1) verwendete Sand K hatte als feinster Sand die größte Steighöhe (64,0 cm). Auf dem Bild wurde links am 7. 5. um 23.00 Uhr mit einer 90 cm langen Injektionsnadel ein intensiv roter, aus dem Sand leicht auswaschbarer Farbstoff injiziert. Am 8. 5. um 18.00 Uhr, also

---

im Bereich von nicht ganz fest bis zu fast flüssig. Die Rheologie befaßt sich besonders mit den Erscheinungen der Hysteresis und der Relaxation (das sind Nachwirkungen), der Ent- und Verfestigung. Die Rheologie ist zum Beispiel sehr wichtig für die Erklärung des Verhaltens kolloidalen Flüssigkeiten.

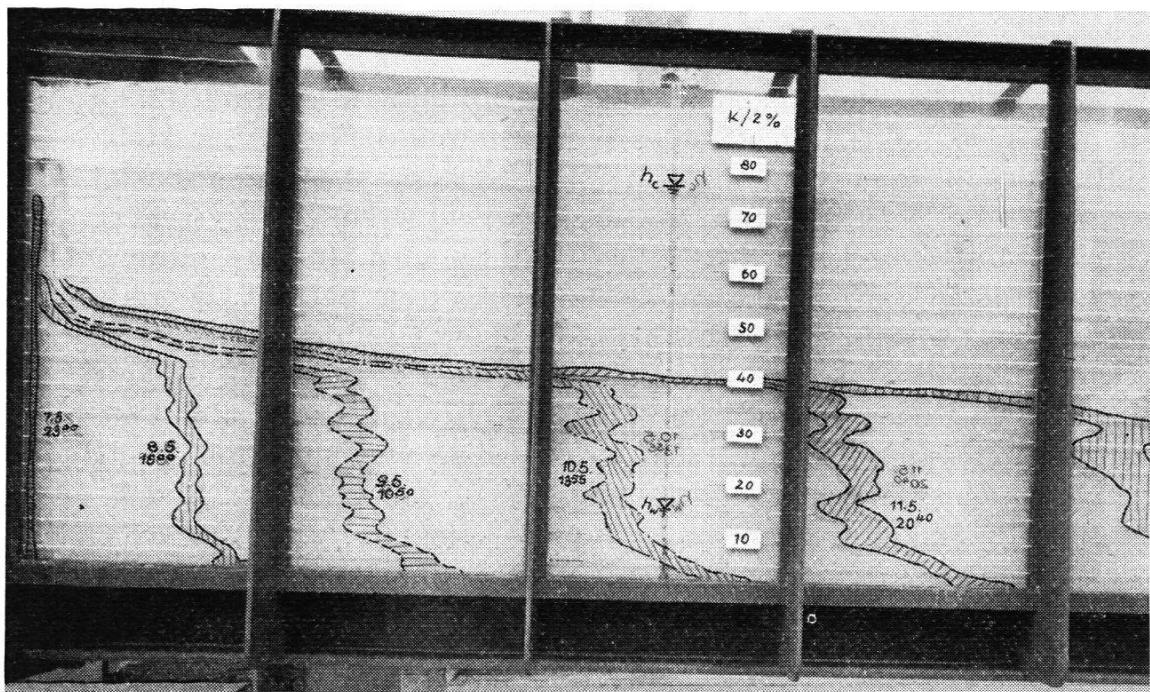


Abb. 1: Teil der Versuchsrinne mit dem Strömungsbild von Versuch 8 (Sand  $K$ , 2% Gefälle). Die Zentimeterinteilung entspricht der Höhe über Rinnensohle.  
 $h_w$  = Wasserspiegelhöhe,  $h_c$  = Kapillarsaumobergrenze

nach 1140 Minuten, wurde der Farbstreifen von der Wasserströmung nach rechts bis zu dem mit 8. 5. bezeichneten, durch eine voll ausgezogene Linie dargestellten Strömungszustand mitgenommen. Der in Bildmitte schwach erkennbare senkrechte dunklere Streifen stellte eine Art Pegelröhren dar, in dem der freie Wasserspiegel (mit  $h_w$  eingetragen) abzulesen war. Die Kapillarsaumobergrenze wurde mit  $h_c$  angegeben.

Durch den nicht genau gleichmäßig erreichbaren Sandeinbau verlaufen die Bilder der einzelnen Strömungszustände in Zickzackform. Außerdem eilt die Strömung am unteren Rinnenende der übrigen Strömung voraus. Diese Erscheinung konnte jedoch als Wand- beziehungsweise Eckstörung identifiziert werden. Abbildung 2 zeigt das gesamte Strömungsbild von Versuch 8 mit der ausgeglichenen Strömungskurve für 7730 Minuten (etwa 5,5 Tage) nach Injektion des Farbstoffes. Rechts oben zeigt die Abbildung 2 den horizontalen Verlauf der Strömung in der Versuchsrinne. Für diese Bestimmung wurde das gesamte Zulaufwasser gefärbt, nach entsprechendem Fortschreiten der Farbfront der Sandkörper aufgeschnitten und der in der Abbildung dargestellte Verlauf der Farbfront gefunden. Auch hier ist das Voreilen der Farbe entlang der Vorder- und Rückwand festzustellen.

Aus Abbildung 2 ist zu ersehen, daß im Kapillarsaum auch über dem Wasserspiegel eine der Grundwasserströmung gleichgerichtete Strömung besteht.

Der Wassergehalt eines Bodens vermindert sich im Kapillarsaum von der vollen Wassersättigung in Höhe des Wasserspiegels bis zu einem

Strömungsbild Vers. 8  
Sand K/2 %

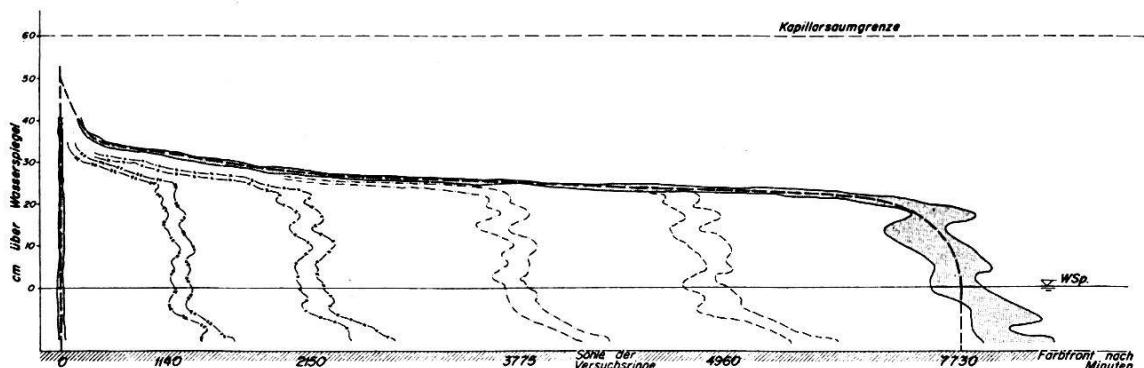
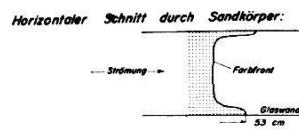
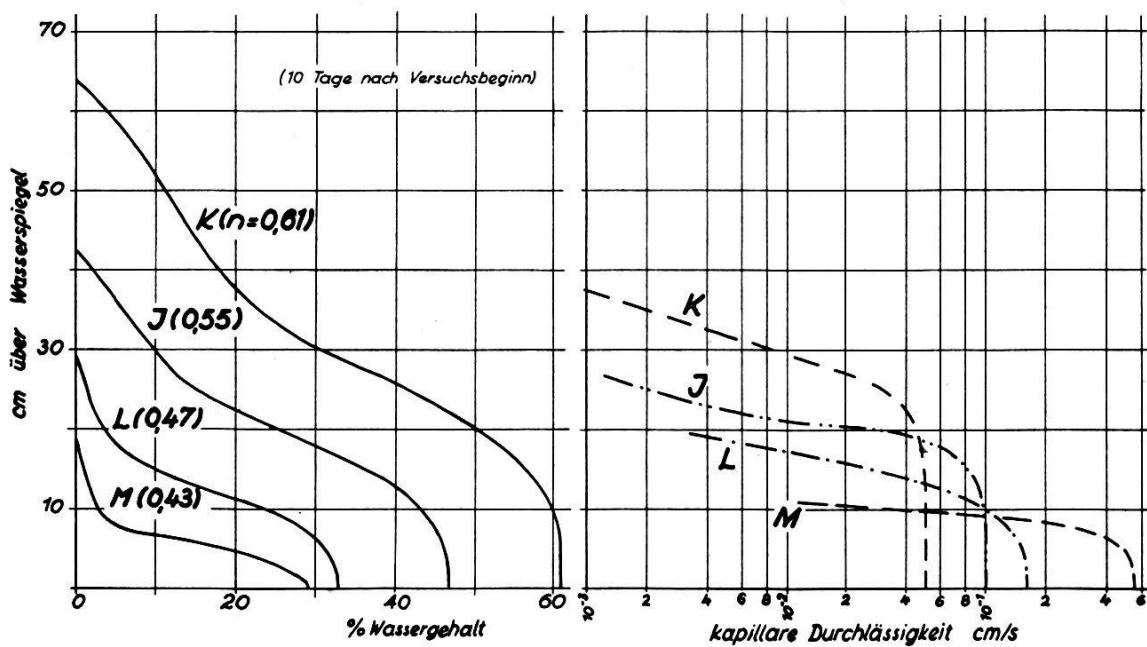


Abb. 2: Gesamtes Strömungsbild von Versuch 8 mit der ausgeglichenen Strömungskurve für 7730 Minuten (etwa 5,5 Tage) nach Versuchsbeginn

Minimalwert in der Höhe der Kapillarsaumobergrenze. Über dem Kapillarsaum steht etwa vorhandenes Wasser nicht mehr in direkter Verbindung mit dem Grundwasser. Abbildung 3 zeigt die Wassergehaltsverteilung im Kapillarsaum der Versuchssande in Abhängigkeit von der Höhe über Wasserspiegel. Daneben wurde die Durchlässigkeit der vier Sande in Abhängigkeit von der Höhe über Wasserspiegel aufgetragen.

Die Durchlässigkeit in Wasserspiegelhöhe entspricht dem oben beschriebenen  $k_f$ -Wert. Im Kapillarsaum finden wir bei nicht voll gesättigtem Boden die sogenannte «kapillare (ungesättigte) Durchlässigkeit»  $k_u$ . Die kapillare Durchlässigkeit ist, wie bereits erwähnt, vom Wasser-

Abb. 3: Wassergehaltsverteilung  
in Abhängigkeit von der Höhe über Wasserspiegel



gehalt abhängig. Bei Anwendung des Darcyschen Gesetzes lässt sich die Sickermenge im Kapillarsaum jeweils berechnen aus:

$$q = k_u \cdot F \cdot i$$

	CGS-Maßsystem	MKS-Maßsystem
$q$ Sickermenge	$\text{cm}^3/\text{s}$	$\text{m}^3/\text{s}$
$k_u$ Kapillare Durchlässigkeit (Durchlässigkeit bei der jeweiligen Sättigung)	$\text{cm/s}$	$\text{m/s}$
$F$ Durchflossener Querschnitt mit der jeweils vorhandenen Sättigung	$\text{cm}^2$	$\text{m}^2$
$i$ Gefälle	dimensionslos	

#### 4. Folgerungen

Die zunehmend durchzuführende Melioration schwer entwässerbarer Böden erfordert immer mehr, die im Boden vorhandene Wasserbewegung sowohl qualitativ als auch quantitativ genau zu erfassen. Sehr wesentlich ist dabei die Bestimmung der verschiedenen Bodenkennwerte, wobei die Durchlässigkeit an erster Stelle steht. Entsprechende Untersuchungen dürfen jedoch nicht einfach nach «Rezept» und unter Nichtbeachtung der vorhandenen hydraulischen Verhältnisse erfolgen.

Desgleichen gewinnt der Kapillarsaum bei der Bodenmelioration immer mehr Bedeutung. Mit grober Näherung kann angenommen werden, daß die Sickerströmung über das untere Drittel des Kapillarsaumes die gleiche Geschwindigkeit wie unter dem Wasserspiegel besitzt. Über ein weiteres Drittel der Kapillarsaumhöhe erfolgt eine starke Abnahme der Geschwindigkeit, die dann ungefähr im zweiten Drittelpunkt den Wert Null erreicht. Der Anteil des Kapillarsaumes an der Grundwasserströmung darf dort nicht vernachlässigt werden, wo die Grundwasseroberfläche (die durch eine undurchlässige Schicht gebildete untere Grenze des Grundwasserleiters) nicht sehr tief liegt. Im Kapillarsaum tritt kapillare Durchlässigkeit an die Stelle des  $k_f$ -Wertes, der nur für das voll gesättigte System gilt. Die kapillare Durchlässigkeit muß überall dort berücksichtigt werden, wo wir die Wasserbewegung über dem Grundwasserspiegel (freie Grundwasseroberfläche) untersuchen. Dies gilt für die Wasseraufnahme der Pflanzen aus dem ungesättigten, durchlüfteten Kapillarsaum des Bodens ebenso wie bei der Bodenmelioration in ariden Zonen, wo durch kapillar hochsteigendes Grundwasser die Gefahr der Versalzung des Bodens besteht.

Die beschriebenen Versuche wurden an nichtbindigen Böden begonnen, weil hier die Zusammenhänge klarer überschaubar und auch versuchstechnisch einfacher zu lösen waren. Für weitere Untersuchungen im Bereich der Schluff- und Lehmböden sind im Rahmen der Versuchsmethodik selbst vorerst noch mannigfaltige Fragen zu lösen.

### *Literaturverzeichnis*

- Blanc* (1938): Die grundlegenden hydraulischen Werte der Böden und ihre Verwertung für die landwirtschaftliche Verwendung des Wassers. Franz. Landwirtschaftsakademie, Verhandlungsschrift vom 2. Februar 1938.
- Bouwer, H.* (1964): Measuring horizontal and vertical hydraulic conductivity of soil with the double-tube method. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 28: 19–23.
- Burger, H.* (1922): Physikalische Eigenschaften der Wald- und Freilandböden. Mitt. Eidg. Anst. Forstl. Versuchswesen, XIII. 1: 1–221.
- Ceçen, K.* (1959): Die Ermittlung des Durchlässigkeitwertes im Zusammenhang mit bautechnischen Bodenuntersuchungen. Diss. TH Graz.
- Diserens, E.* (1934): Beitrag zur Bestimmung der Durchlässigkeit des Bodens in natürlicher Bodenlagerung. *Schweiz. Landw. Monatshefte*, XII: 1–19.
- Ernst, L. F.* (1950): En nieuwe formule voor de berekening van de doorlaatfactor met de boorgatenmethode. *Med. Landb. Proefst. en Bodemk. Inst. Groningen*.
- Khafagi, A.* (1944): Die Durchlässigkeit des Bodens in seiner natürlichen Lagerung. *Schweiz. Z. f. Verm. u. Kulturt.*, 42: H. 1–4.
- Kozeny, J.* (1953): *Hydraulik*. Springer, Wien.
- Lecher, K.* (1964): Kapillarität und Sickerströmung in ungesättigten, nichtbindigen Böden. Diss. ETH Zürich.
- Massing, H.* (1964): Die Permeabilität des Bodens. Problematik und Folgerungen. Mitt. Inst. f. Wasserwirtschaft u. landw. Wasserbau, TH Hannover, H. 6: 41–65.
- Mühlbauer, H.* (1964): Neue Verfahren zur Bestimmung der Felddurchlässigkeit in grundwasserfreien Böden. Mitt. Inst. f. Wasserwirtschaft u. landw. Wasserbau, TH Hannover, H. 6: 66–100.

## **Vom X. zum XI. Internationalen Kongreß für Photogrammetrie**

### **Ein Blick auf die Resolutionen von Lissabon**

*Von H. Kasper, Zürich*

Die Zeitschriften «Photogrammetria» und «Bildmessung und Luftbildwesen» pflegen die großen Ereignisse des internationalen Vereinslebens der Photogrammeter ausführlich zu besprechen. Diese Berichte sind den interessierten Lesern unserer Zeitschrift so leicht zugänglich, daß hier eine Wiederholung meist kaum erforderlich ist. Im Hinblick darauf, daß der nächste Internationale Kongreß für Photogrammetrie im Jahre 1968 in der Schweiz stattfindet, ist es jedoch diesmal angebracht, alle Mitglieder der SGP eingehend darüber zu informieren, in welcher Richtung die Delegierten der Mitgliederstaaten der Internationalen Gesellschaft für Photogrammetrie die gemeinsamen Bestrebungen zur Förderung der Photogrammetrie während der vier Jahre zwischen den Kongressen steuern wollen und worüber am nächsten Kongreß Berichte erwartet werden.

Es soll hier nicht von Organisations- und Statutenfragen die Rede sein. Hierüber wird wohl der neue Präsident der Internationalen Gesell-