

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: 65 (1967)

Heft: 2

Artikel: Der Eintrittsbereich an Drainagerohren

Autor: Widmoser, P.

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-221517>

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: 23.02.2026

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

Der Eintrittsbereich an Drainagerohren

Von Dr. P. Widmoser, ETH, Zürich

Nach einem Referat für den Kulturtechnischen Fortbildungskurs 1967:
Drainage mittels Kunststoffen

Zusammenfassung

Eintrittsbereich am Drainrohr. Bei der Bodenentwässerung sind neben der Durchlässigkeit des Bodens auch die verschiedenen geometrischen Randbedingungen für die Wasserzuströmung zum Drain entscheidend. Die Randbedingung des Drainrohres wird erst seit kurzem, ausgelöst durch die Verwendung neuer Drainagerohrmaterialien, theoretisch und im Labor untersucht. Es läßt sich zeigen, daß gemäß den Prinzipien der Potentialtheorie die Zuströmung innerhalb eines relativ engen Bereiches um das Drainrohr oft entscheidend beeinflußt wird.

In dieser Abhandlung wird versucht, den Begriff des Einflußbereiches in leichtverständlicher Weise herauszuarbeiten. Einige praktische Hinweise werden abgeleitet. Insbesondere wurden die Eintrittsleistungen verschiedener Rohrtypen gegenübergestellt. Auf einige Faktoren, welche den Eintrittsbereich beeinflussen, wird hingewiesen.

Résumé

Zone d'entrée dans le drain. Dans l'assainissement du sol, en plus de la perméabilité, différentes conditions aux limites géométriques de l'apport d'eau dans le drain sont aussi déterminantes. La condition aux limites du drain s'est présentée lors de l'utilisation de drains en matière nouvelle et a été étudié dernièrement en théorie et en laboratoire. On peut démontrer que, selon les principes de la théorie potentielle, l'apport d'eau est souvent influencé d'une manière décisive dans une zone relativement restreinte autour du drain.

Dans cette étude, nous essayons de présenter dans une manière facilement compréhensible la notion de zone d'influence. Nous en déduisons quelques indications pratiques. En outre, le débit d'entrée de différents types de drain est comparé. Nous mentionnons aussi divers facteurs qui influencent la zone d'entrée.

Einleitung

Eine wesentliche Funktion jedes Drainstranges besteht in der Zuströmung des nicht gebundenen Bodenwassers zum Drainagerohr. Die Zuströmung, durch die Schwerkraft hervorgerufen, wird in ihren Bestimmungsgrößen (Geschwindigkeit, Richtung, Wassermenge, Strömungswiderstand) durch mehrere Faktoren bestimmt.

So treten zum Beispiel beim Durchströmen eines porösen Mediums, als welches der Boden hier aufzufassen ist, Reibungswiderstände auf. Diese, abhängig von der Porosität, Teilchenform, Lagerung des Bodenmaterials sowie von der Viskosität der strömenden Flüssigkeit, werden in der Bodenphysik unter dem k -Wert zusammengefaßt.

Weiter ist bekannt, daß bei laminarer Strömung die Geschwindigkeit als direkt proportional zur Druckdifferenz Δh zwischen zwei Punkten (angenähert meßbar in zwei Standrohren) betrachtet werden kann.

Diese Tatsachen finden ihren Ausdruck in der bekannten Darcy-Formel, die in Gleichung (1) in allgemeiner Form dargestellt ist:

$$v = - \operatorname{grad}(\varphi) = - \operatorname{grad}(k \cdot \Delta h) \quad (1)$$

Dabei treten die genannten Größen k und Δh sofort erkennbar auf.

Es soll nun für die stationäre, quell- und turbulenzfreie Strömung ein weiterer Einflußfaktor gezeigt werden. Dieser sei zunächst an einem Modellversuch dargestellt.

Einfluß der Randbedingungen

Spannt man zwei rechteckförmige Scheiben (S) parallel und in geringem Abstand ($< 1 \text{ cm}$) voneinander in einem Rahmen (R_a), so daß diese nach drei Seiten abgedichtet sind, so entsteht ein Behälter in Form etwa einer Tasche (siehe Bild 1).

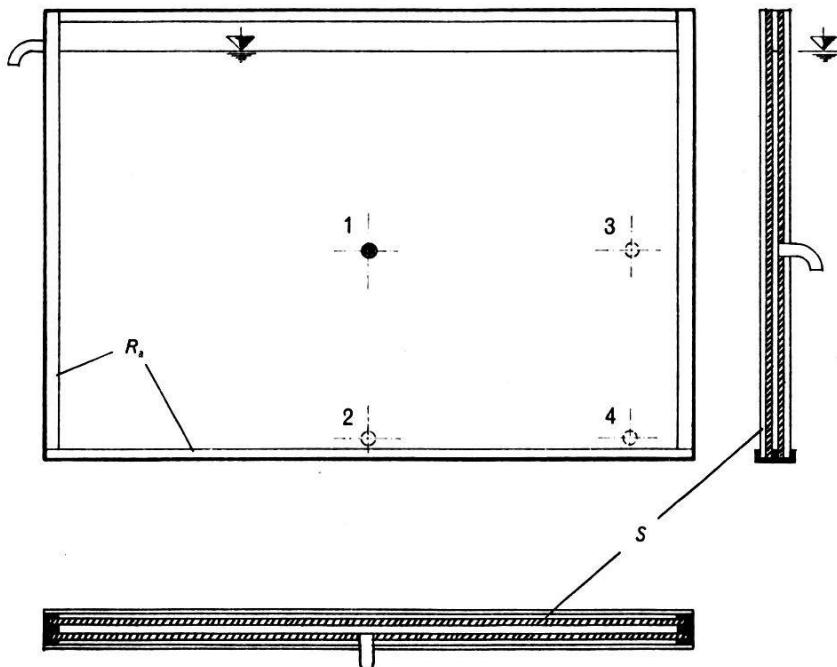


Bild 1: Hele-Shaw-Modell; Skizze

Der Behälter wird mit einer zähen Flüssigkeit (Öl, Sirup) gefüllt, welche durch ein perforiertes Rohr ausströmen kann. Bei konstantem Scheibenabstand und konstanter Viskosität (sehr temperaturabhängig) wird mit diesem Modell ein fester k -Wert nachgebildet. Bei stationärem Zustand fließt gleich viel zu wie ab, und innerhalb einer konstanten geometrischen Höhenlage bleibt auch die Druckhöhe über dem Rohr gleich. Dennoch werden die Bestimmungsgrößen der Zuströmung verschieden sein, je nachdem, ob das Rohr in der Mittellage (1) oder am seitlichen

Rand (3) angebracht ist. Bei einer Rohrlage über dem Behälterboden (2) wird sich die Zuströmung wiederum gegenüber Lage (1) und (3) anders verhalten, auch wenn über dem Rohr der gleiche Druck eingestellt wurde, was durch Verwendung einer Flüssigkeit mit kleinerem spezifischem Gewicht möglich ist.

Mit Hilfe des soeben beschriebenen *Hele-Shaw*-Modells wurde der Einfluß der sogenannten Randbedingungen demonstriert. Sie beeinflussen zusammen mit dem k -Wert und der Druckhöhe die Strömungsgeschwindigkeit, die Zuströmmenge sowie den Zuströmwiderstand. Die Richtung der Filterströmung (darstellbar durch Stromlinien) und das mit dieser in Zusammenhang stehende Bild der Linien gleichen Druckes (Äquipotentiallinien) wird sogar ausschließlich von den Randbedingungen bestimmt.

Drei Randbedingungen kann man am Modell sofort erkennen:

- die obere Begrenzung der Flüssigkeit, entsprechend dem *Grundwasserspiegel* in der Natur;
- die beiden Seitenränder, welche im Fall einer Reihe von Drainagesträngen durch die *Trennebenen in Drainmitte* ersetzt werden;
- der Behälterboden, welcher in der Natur durch *waagrechte, undurchlässige Schichten* eine Entsprechung findet. Dabei kann eine Schicht wahrscheinlich als undurchlässig betrachtet werden, wenn ihr k -Wert $1/5$ bis $1/10$ vom k -Wert des Oberbodens beträgt.

Am Modell nicht erkennbare weitere Randbedingungen im mathematisch-physikalischen Sinn sind:

- eventuell auftretende *Zonen mit verschiedenen k -Werten* (im Modell: Zonen mit anderen Scheibenabständen);
- die *Geometrie des Rohres* sowie der daran angebrachten Eintrittsöffnungen. Diese werden entscheidend sein, wenn wir die hydraulische Leistungsfähigkeit von Rohren untersuchen.

Die Drainformeln

Ein großer Teil der theoretischen Forschungsarbeit auf dem Gebiet der Grundwasserströmungen lief darauf hinaus, diese Randbedingungen zu erfassen; dies geschah für die drei zuerst genannten bereits ab 1930 [3, 4, 10], für die zwei letztgenannten Randbedingungen (Zonen verschiedener Durchlässigkeit, Rohrgeometrie) erst in letzter Zeit [5, 12, 13]; eine Ausnahme bildet die Studie von *Kozeny* [15], welcher 1933 versuchte, den Einfluß der Fugen an Tondrainagerohren auf die eintretende Wassermenge zu bestimmen. Ohne auf die theoretischen Grundlagen einzugehen, soll eine der Annahmen von *Hooghoudt-Ernst* ihrer anschaulichkeit wegen kurz angedeutet werden. Da die allgemeine Darcy-Formel, wie sie in Gleichung (1) angegeben wurde, nur für einfache geometrische Verhältnisse (zum Beispiel Parallel- und Radialströmung) mathematisch ohne weiteres lösbar ist, zerlegt man den allgemeinen Fall einer Grundwasserströmung (Bild 2 links) in ihre Strömungskomponenten, nämlich in die Vertikal-,

Horizontal- und Radialkomponente (Bild 2 rechts). Durch diese Vereinfachung treten für praktische Zwecke keine Fehler auf, solange der Drainagerohr-Durchmesser ein bestimmtes Grenzverhältnis zum Drainabstand nicht überschreitet. Dies ist in der Praxis fast immer der Fall.

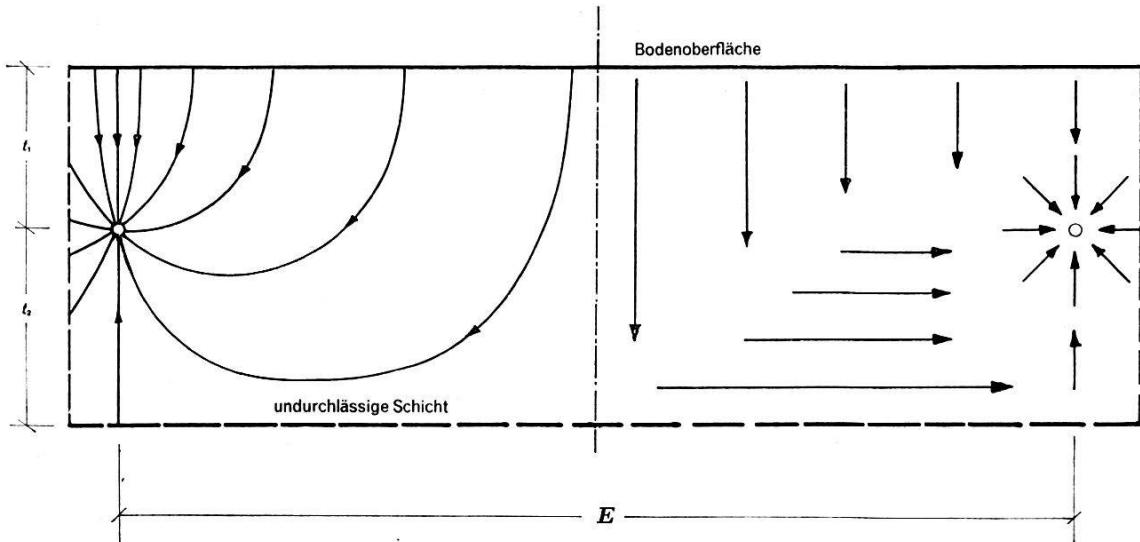


Bild 2: Zerlegung der Zuströmung in Komponenten; Skizze

Die erwähnten Überlegungen führen mit weiteren Kunstgriffen zu Formeln, die einen Zusammenhang zwischen folgenden Größen geben:

Bei festgelegtem Q ... Niederschlags- oder Schneeschmelzwasser, welches in einer bestimmten Zeitperiode abgeführt werden soll

t_2 ... Abstand von Drainmitte zur undurchlässigen Schichte

bei gewähltem D ... Drainrohrdurchmesser

t_1 ... Draintiefe, Bodenoberfläche bis Drainmitte

bei gewünschtem Δh ... Höhe des Grundwasserspiegels über den Drains an der Stelle der höchsten Aufwölbung

kann E ... der Drainabstand, welcher bei systematischer

Drainung im Flachland zumeist interessiert, ermittelt werden. Alle früher angegebenen Randbedingungen (nach Hooghoudt-Ernst lassen sich auch horizontale Schichten verschiedener k -Werte berücksichtigen) sind dabei für den stationären Zustand mit einer Ausnahme erfaßt. Weder die Hooghoudt-Formel noch andere der bekannten Drainformeln stellen die Geometrie der Eintrittsöffnungen in Rechnung. Dies geschieht mit dem Hinweis, daß der verfüllte Graben eine höhere Durchlässigkeit (k -Wert) aufweise, wodurch der zusätzliche Einfluß durch die Eintrittsöffnungen wieder aufgehoben wird. Diese Annahme wird, den Erfahrungen nach, bei weitem nicht allen Fällen gerecht.

Die Nichtbeachtung der Drainrohr-Randbedingungen läßt sich einerseits damit erklären, daß die mathematischen Lösungen bereits einfach scheinender Geometrien (zum Beispiel Fugen an Tonrohren) verhältnismäßig kompliziert und erst mit den neuen mathematischen Hilfsmitteln (Datenverarbeitungsmaschinen) wirtschaftlich lösbar sind. Diese Schwierigkeit hätte sich allerdings noch durch Modellversuche umgehen lassen. Es zeigt sich aber weiter, daß durch die bisher zumeist üblichen Tonrohre gar keine eindeutige Geometrie festgelegt wird. Die Fugenabstände hängen von der Sorgfalt der Verlegung, von der Herstellungsgüte und, wie Kowald [14] festgestellt hat, von der Feuchtigkeitsausdehnung der Tonrohre (in einem Versuch nach 310 Tagen zwischen 0,13 und 0,32 mm) ab. Bei Kunststoffrohren zum Beispiel ist die Schlitzgeometrie jedoch eindeutig. Wie weit eventuell fließplastische Vorgänge deren Slitze verändern, wurde noch nicht festgestellt.

Der Radialbereich ohne Einfluß des Rohres

Für die folgende theoretische Betrachtung der Zuströmung im Drainrohrbereich wird zunächst nur radiale Zuströmung angenommen (siehe Bild 2 rechts) und diese getrennt von all den übrigen Einflußfaktoren betrachtet. Die erste Annahme wird dabei für alle praktischen Fälle voller Bodensättigung, in denen die undurchlässige Schichte tiefer als ein Viertel des Drainabstandes, also $t_2 \geq E/4$ ist, das Ergebnis nicht verfälschen.

Es kommt uns nämlich zugute, daß der Einfluß weiterer Randbedingungen mit zunehmender Entfernung abnimmt.

An einem Drainrohr, welches so stark perforiert ist, daß die Rohrwandung keinen meßbaren Einfluß mehr ausübt (als Beispiel kann auch ein Maulwurfdrain gelten), wird bei radialer Zuströmung dennoch ein Widerstand auftreten, welcher nicht allein vom k -Wert und der Zuströmung abhängig ist und als randbedingter *Radialwiderstand* bezeichnet sei.

Die spezielle Darcy-Gleichung für diesen Fall (siehe Bild 3) lautet:

$$Q = \Delta h \frac{2 \pi k}{\ln \frac{R_1}{R_0}} \quad (2)$$

Als Widerstand gilt definitionsgemäß der Druckverlust Δh pro Einheitswassermenge und pro Längeneinheit (in Richtung der Rohrachse gemessen), so daß sich in diesem Fall der Radialwiderstand aus (2) ergibt mit:

$$W_R = \frac{\Delta h}{Q} = \frac{\ln \frac{R_1}{R_0}}{2 \pi k} \quad (3)$$

Da der Einfluß des k -Wertes in diesem Zusammenhang nicht interessiert, wird k gleich 1 gesetzt (durch den Index 1 angedeutet, welcher weiterhin

im Text aber nicht mehr ausgeschrieben wird), und wir erhalten den dimensionslosen Wert:

$$W_{R,1} = \frac{\ln \frac{R_1}{R_0}}{2 \pi} \quad (4)$$

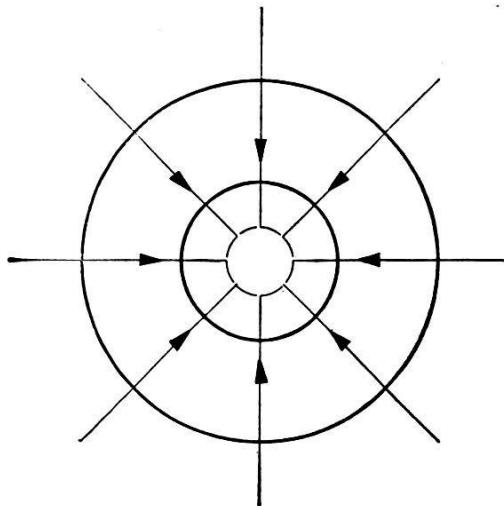


Bild 3: Radiale Zuströmung

Der Radialwiderstand nimmt demnach umgekehrt proportional mit dem Logarithmus des Drainrohrradius und direkt proportional mit dem Logarithmus des Abstandes R_1 zu. Entsprechend der abnehmenden Steigung der logarithmischen Funktion mit zunehmendem Funktionswert ist die Zunahme des Radialwiderstandes in Rohrnähe am größten und mit zunehmendem Abstand von R_0 immer geringer (Bild 4).

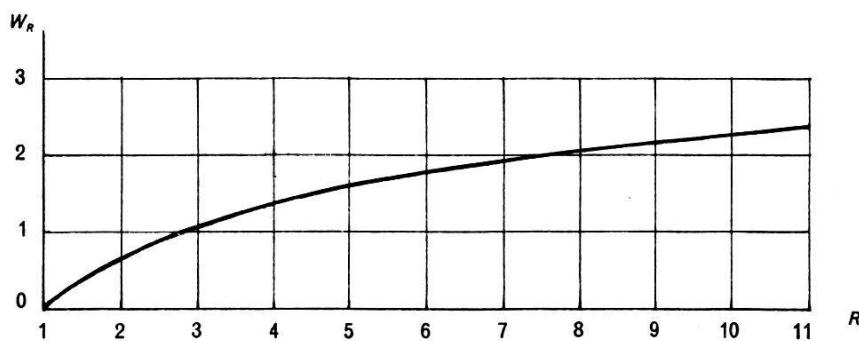


Bild 4: Logarithmische Verteilung des Radialwiderstandes

Diese Tatsache macht man sich zum Beispiel praktisch im Brunnenbau zunutze. Nach Abteufung eines senkrechten Brunnenrohres kann die Brunnenergiebigkeit dadurch gesteigert werden, daß man sternförmig um das Brunnenrohr horizontal Rohre anschließt (Horizontalfilterbrunnen).

Der homogene Eintrittsbereich mit Einfluß des Rohres bei radialer Zuströmung

In der Praxis werden Drainagerohre verwendet, welche geometrisch von dem idealisierten, stark perforierten Rohr abweichen. Bei einem Tonrohr NW 50 (Außendurchmesser 7 cm) und einem Fugenabstand von 1,5 mm beträgt die Eintrittsfläche pro Laufmeter zum Beispiel 10 cm^2 ; das sind weniger als 0,5 % der gesamten Rohrwandfläche. Die Eintrittsfläche der meisten handelsüblichen Kunststoffdrainagerohre (NW 50) liegt in der gleichen Größenordnung, wobei allerdings die Schlitzbreite nur etwa die Hälfte des oben angenommenen Fugenabstandes beträgt. Dadurch tritt ein zusätzlicher *Drainrohrwiderstand* W_0 auf. Es ist von vornherein keineswegs klar, wie sich der Rohrwiderstand mit dem Radialwiderstand überlagern wird. Im Strömungsbild kann man erwarten, daß die logarithmische Verteilung der kreisförmigen Potentiallinien zumindest in Schlitznähe gestört sein wird. Entsprechend werden die ursprünglich geraden Stromlinien, die ja stets senkrecht zu den Potentiallinien stehen, verändert.

Unsicher ist ferner ohne nähere Untersuchung, ob der Einfluß der Eintrittsöffnungen, die ja im Vergleich zu den anderen Rohrabmessungen sehr klein sind (Größenordnung 1:100 bis 1:300), noch in Rohrnähe so weit abnimmt, daß darüber hinaus wieder für praktische Zwecke die Radialströmung angenommen werden kann. Ist dies der Fall, so könnte man ein Gebiet abgrenzen, welches hydraulisch von den Eintrittsöffnungen bestimmt wird und welches damit als Eintrittsbereich definiert wäre. Schließlich wäre es noch wissenswert, in welchem Maße die Parameter Schlitz- beziehungsweise Fugenbreite, Schlitzlänge, Schlitzreihenanzahl und Eintrittsöffnung den Drainrohrwiderstand W_0 beziehungsweise den Eintrittsbereich beeinflussen.

Zur Beantwortung dieser und damit verbundener Fragen laufen, soweit aus der Literatur ersichtlich, vor allem in Holland seit etwa 1960 Untersuchungen, welche sich fast ausschließlich auf Sandmodelle stützen [1, 2, 11 und 22]. Eine weitere Arbeit darüber wurde knapp vor Drucklegung dieses Artikels in Österreich von *Feichtinger* veröffentlicht [7].

Die ETH Zürich liefert nach einjähriger Forschungsarbeit einen theoretischen Beitrag [23]. Man muß festhalten, daß die Untersuchungen noch nicht abgeschlossen sind. Die wesentlichen bisherigen Erkenntnisse in bezug auf die eben gestellten Fragen sind daher in diesem Abschnitt ohne weitere Hinweise nur kurz zusammengestellt.

- Die logarithmische Verteilung kreisförmiger Potentiallinien wird durch Eintrittsöffnungen an der Rohrwand tatsächlich nur innerhalb eines bestimmten *Einflußbereiches* gestört (Bild 5, Zuströmung zu einem längsgeschlitzten Rohr).
 - Die Störung reicht zwar an sich bis unendlich. Bei Festlegung einer frei wählbaren Abweichung vom wahren Wert wird jedoch der Einflußbereich abgegrenzt.

Als anschaulichen Vergleich dazu kann man im Wasserbau den Aufstau eines freien Abflusses anführen. Der dadurch hervorgerufene Rückstau reicht theoretisch bis unendlich. Er wird aber durch seine asymptotische Annäherung an den ungestaute Wasserspiegel bei gewählter Genauigkeitsgrenze durch den sogenannten «Rückstaubereich» abgegrenzt.

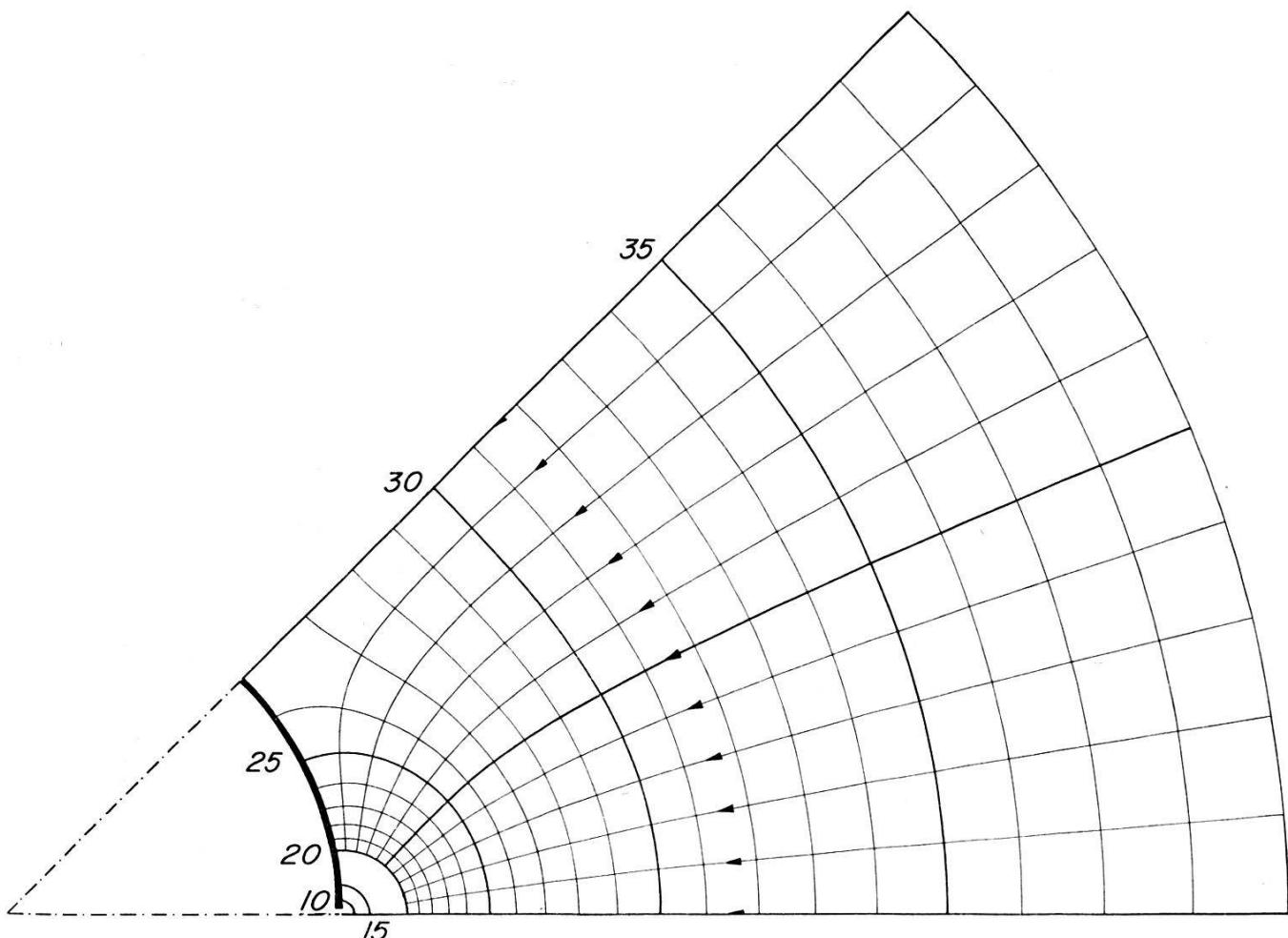


Bild 5: Strömungsbild zu einem Schlitz

Bild 6 gibt den *Grenzradius*, welcher den Eintrittsbereich festlegt, für geschlitzte Rohre als Vielfaches des Rohrradius R_0 bei gewählten Abweichungen von 1 % und 5 % von R_0 an. Der Grenzradius wird stark von der Schlitzreihenanzahl innerhalb der handelsüblichen Kunststoffdrainrohre beeinflußt. Der Eintrittsbereich liegt bei mehr als 3 Schlitzreihen etwa in einem Abstand, welcher $\leq 4,6 \cdot R_0$ von der Drainmitte liegt. Bei Tonrohren von 30 cm Länge liegt der Grenzradius ca. 21 cm von der Rohrwand (Abweichung von 1 %).

– Der Rohrwiderstand baut sich innerhalb dieses Einflußbereiches auf, was in Überlagerung mit dem Radialwiderstand einen besonders steilen Druckabfall Δh in Rohrnähe bewirkt.

Außerhalb des Eintrittsbereiches wirkt der Rohrwiderstand als konstanter Faktor W_0 weiter, welcher zu den übrigen Widerständen addiert

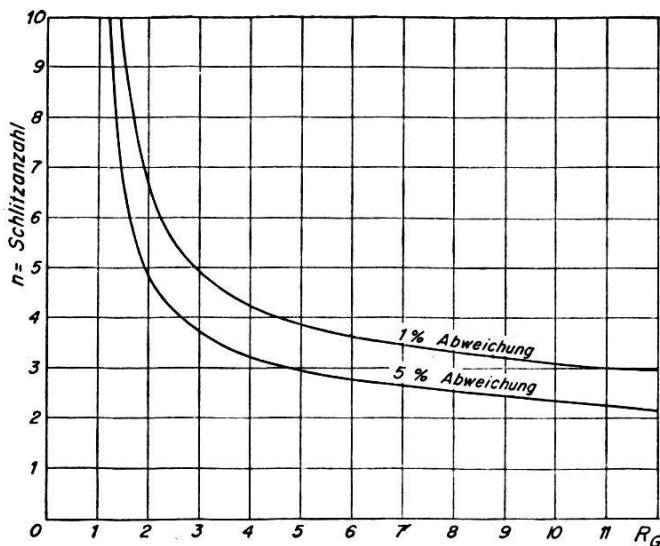


Bild 6: Grenzradius für Übergang zu Radialströmung in Abhängigkeit von der Schlitzreihenanzahl

werden kann. Die Potentiallinien folgen wieder der Kreisform und der logarithmischen Verteilung; ihr Betrag ist jedoch um den Wert $(Q/k) \cdot W_0$ gestiegen. Die der Gleichung (4) entsprechende Gleichung lautet nun im Fall nicht voll durchlässiger Rohre bei zweidimensionaler Betrachtung (Schlitze durchgehend in Achsrichtung):

$$W = \frac{\ln \frac{R_1}{R_0}}{2 \pi} + \frac{\ln \frac{4 R_0}{bn}}{n \pi} = W_R + W_0 \quad (5)$$

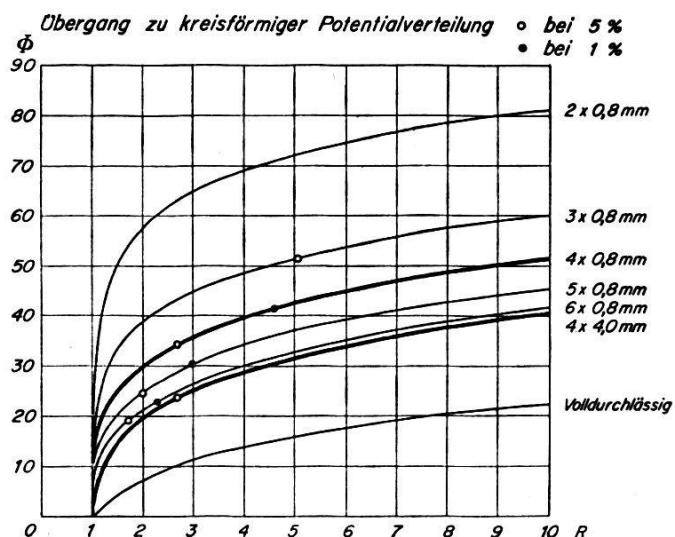


Bild 7: Potentialverteilung entlang Strahl durch Schlitzmitte bei verschiedenen Schlitzkombinationen (b auf $R_0 = 2,5$ bezogen)

Werden die Potentiallinien in Bild 5 als Schichtenlinien aufgefaßt, so gibt Bild 7 Schnitte senkrecht zur Bildebene durch die Schlitzmitte (R_0 wurde gleich 1 gesetzt).

– Wird wie im vorhergehenden Abschnitt der Widerstand auf einen k -Wert gleich 1 bezogen, so erhalten wir dimensionslose W_0 -Werte, welche sich als *hydraulische Kennwerte* für verschiedene Rohrtypen (Rohrkonstanten) anbieten. Sie geben den Einheitswiderstand eines Rohres bei radialer Zuströmung von außen an.

– W_0 -Werte, welche mit Hilfe eines elektrischen Analogs gemessen wurden, sind für verschiedene Schlitzkombinationen und in Abhängigkeit von verschiedenen Parametern in den Bildern 8 und 9 dargestellt.

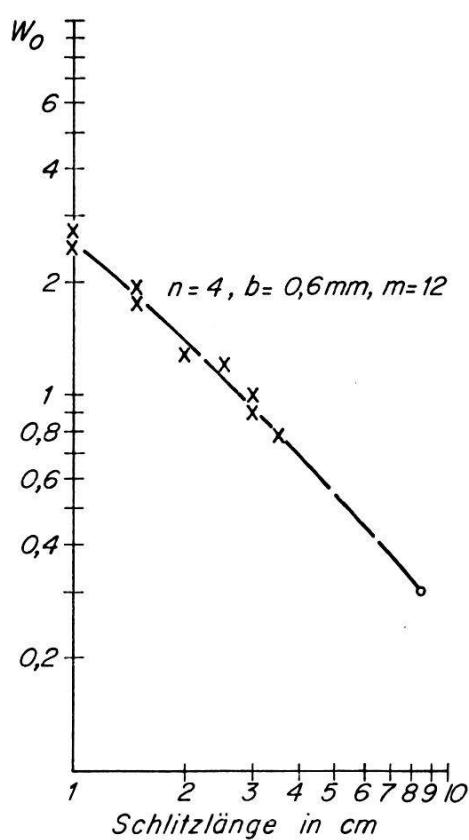


Bild 8
Eintrittswiderstand,
gemessen als Funktion der Schlitzlänge

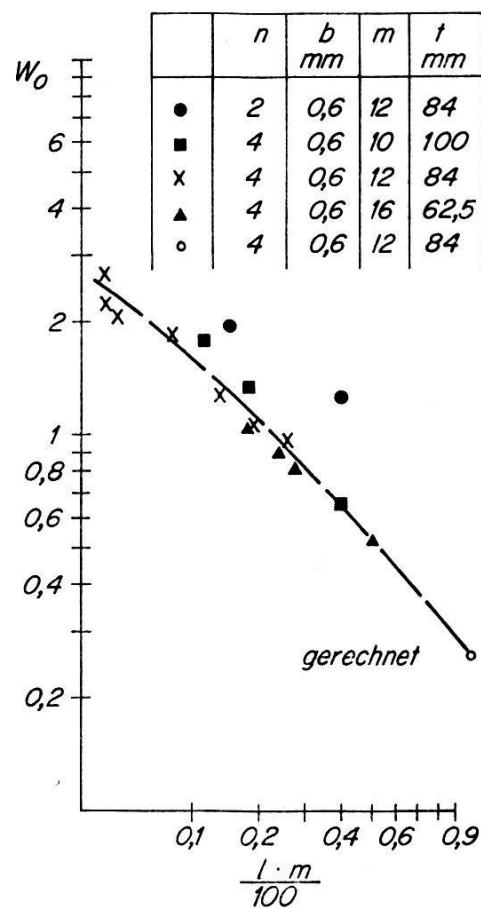


Bild 9: Eintrittswiderstände, gemessen
als Funktion der Gesamteintrittsöffnung
für verschiedene Schlitzkombinationen

Diesen Meßwerten wurden für Vergleichszwecke gerechnete Werte W_0 für Tonrohre (Bild 10) und gelochte Rohre (Bild 11) gegenübergestellt. Eine Betrachtung dieser graphischen Darstellungen gibt Einblick in den Zusammenhang der verschiedenen Parameter (die Bezeichnungen sind der Legende zu Beginn des Artikels zu entnehmen). Die berechneten Werte sind in Bild 11 für den Bereich, in welchem sie nach der Theorie

ungenau werden, kurz strichliert eingetragen. Unter anderem ersieht man, daß Tonrohre theoretisch gegenüber geschlitzten oder gelochten Rohren gleichen Durchmessers einen wesentlich größeren Eintrittswiderstand aufweisen. Vergleicht man Lochöffnungen mit Schlitzen gleicher Eintrittsfläche, so weisen gelochte Rohre gegenüber Schlitzrohren einen um so höheren Eintrittswiderstand auf, je geringer die Schlitz- beziehungsweise Lochanzahl pro Laufmeter Rohr ist.

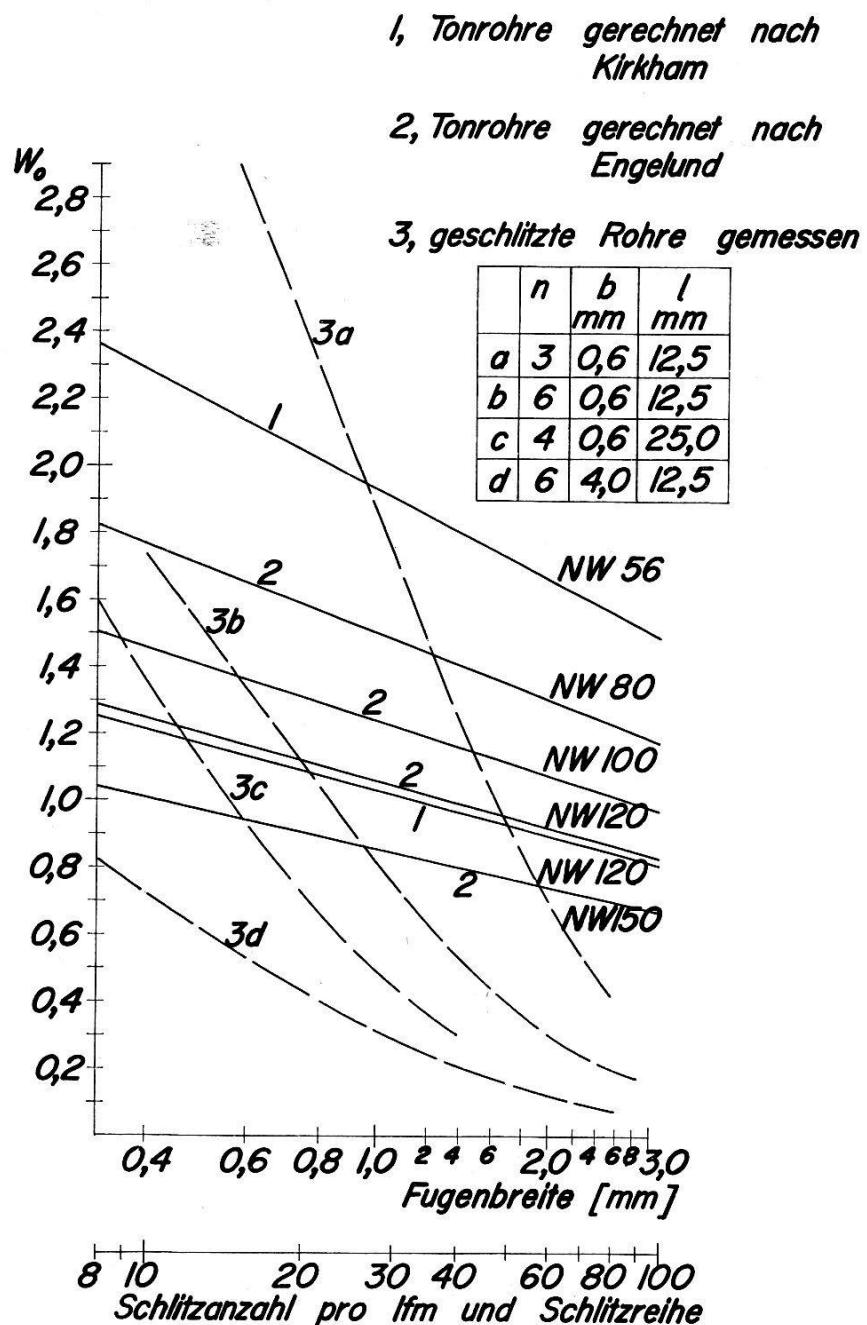


Bild 10: W_0 -Werte von geschlitzten Rohren NW 50 (gemessen) und Tonrohren (gerechnet) in Abhängigkeit von der Schlitzanzahl pro Laufmeter Rohr und Schlitzreihe beziehungsweise von der Fugenbreite

– Die *Zuströmgeschwindigkeit* verteilt sich nicht gleichmäßig über eine Fugen- oder Schlitzbreite. Sie erreicht an den Fugenrändern beziehungsweise Schlitzzecken Maxima (siehe Bild 12), welche vor allem bei nicht-bindigen Böden zur Ausschlämmung aus dem Bodenkörper führen können. Bei Sandböden könnte auch begrenzt Turbulenz auftreten, was einen zusätzlichen Widerstand bedeutet. Je grobsandiger der Boden, um so wahrscheinlicher ist dies zu erwarten.

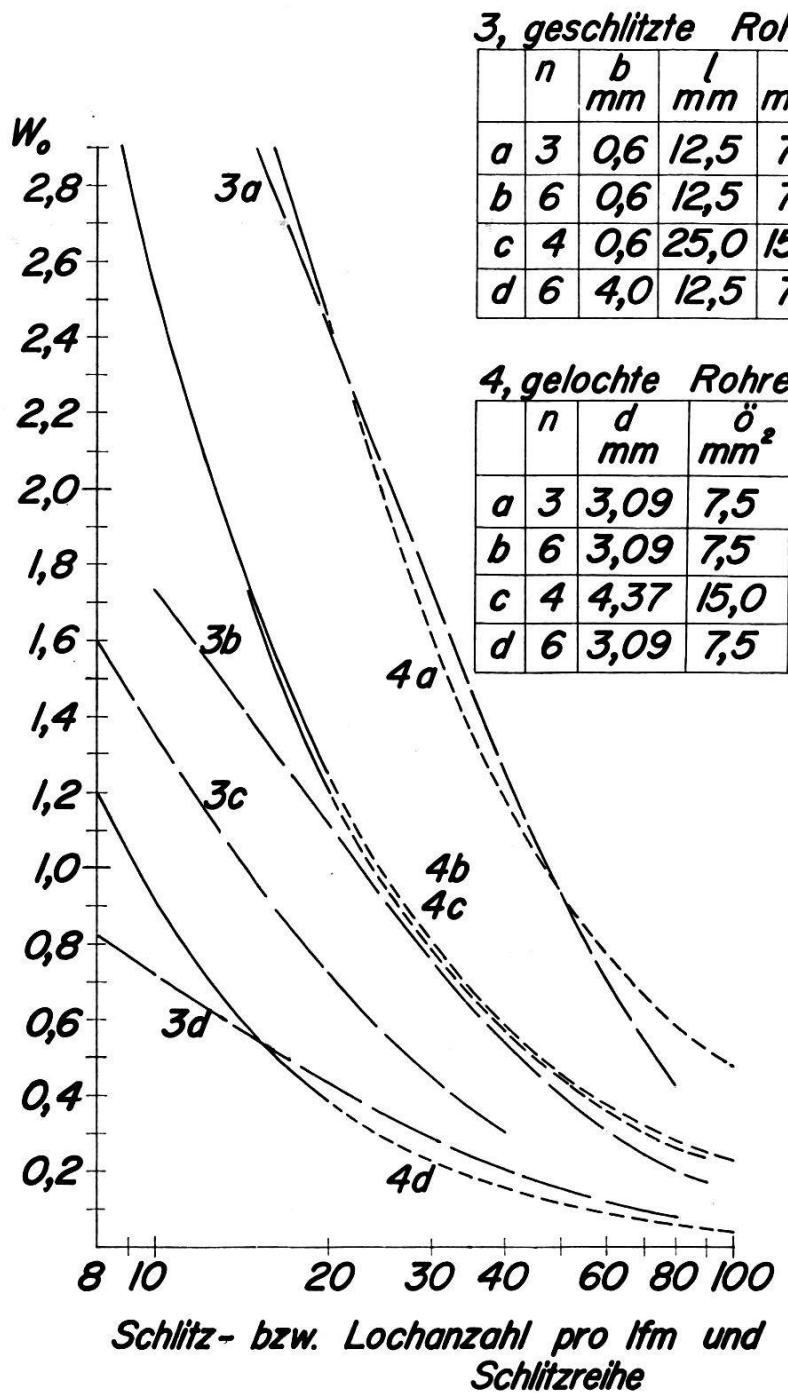


Bild 11: W_0 -Werte von geschlitzten Rohren (gemessen) und gelochten Rohren (gerechnet nach Engelund), alle NW 50, in Abhängigkeit von der Schlitz- beziehungsweise Lochanzahl pro Laufmeter Rohr und Schlitz- beziehungsweise Lochreihe

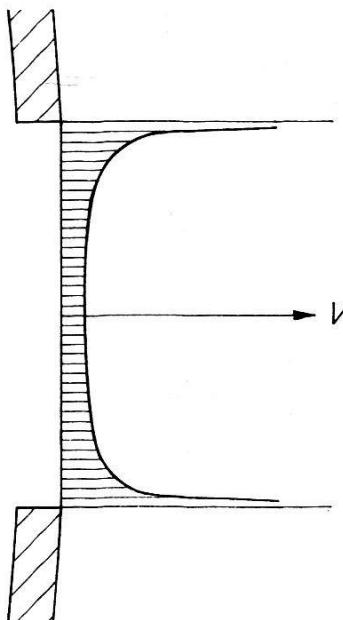


Bild 12
Theoretische Geschwindigkeitsverteilung
bei Zuströmung zu einem Schlitz (unbestimmt an den
Schlitzrändern)

Im Falle eines geschlitzten Rohres mit dem äußeren Durchmesser $D = 50$ mm, 4 Schlitzreihen und einer Schlitzbreite von 0,8 mm verteilt sich zum Beispiel die auf einen Schlitz entfallende Wassermenge Q entsprechend den Geschwindigkeiten folgendermaßen:

ca. 50% von Q fließen durch 71% (0,56 mm)

der Gesamtfläche in Schlitzmitte,

ca. 50% von Q fließen durch 29% (0,24 mm)

der Gesamtfläche an den zwei Schlitzrändern.

Der inhomogene Eintrittsbereich bei radialer Zuströmung

Die bisherigen Überlegungen und Angaben galten für den Fall eines homogenen Erdkörpers um das Rohr, welcher mit den Fugen beziehungsweise Schlitten bündig abschließt (siehe Bild 13).

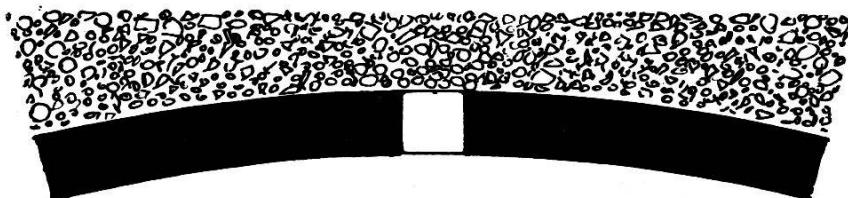


Bild 13

Jede Änderung der Homogenität des Erdkörpers wirkt sich aber innerhalb des Eintrittsbereiches besonders stark auf die Zuströmung aus.

Im Falle der *Ausschlämmung* aus dem Bodenkörper erniedrigt sich der Eintrittswiderstand. Diese Reduktion lässt sich für Fugen und Schlitte berechnen, wenn man als Vereinfachung jeweils den zweidimensionalen Fall betrachtet. Bild 14 zeigt die reduzierten Eintrittswiderstände bei kreisförmiger und elliptischer Ausschlämmung um Rohrschlitte.

Die Reduktion beträgt zum Beispiel bei elliptischer Ausschlämmung eines Kunststoffrohres mit 4 Schlitzreihen und einer Schlitzbreite von 0,8 mm 11 %. Es kann vorkommen, daß bei größerer Schlitzanzahl ($n = 10$ in Bild 15) oder bei weiterer Ausschlämmung, als in Bild 14 dargestellt, der Eintrittswiderstand sogar kleiner wird als der eines volldurchlässigen Idealrohres gleichen Durchmessers. Ein solcher Fall ist aus Sandmodellversuchen bekannt [1]. Die Rohrrandbedingungen ändern sich so stark, daß praktisch der ursprünglich eingesetzte Rohrdurchmesser keine Gültigkeit mehr hat.

Bild 14
Kreisförmige (links) und
elliptische Ausschlämmung
(rechts)

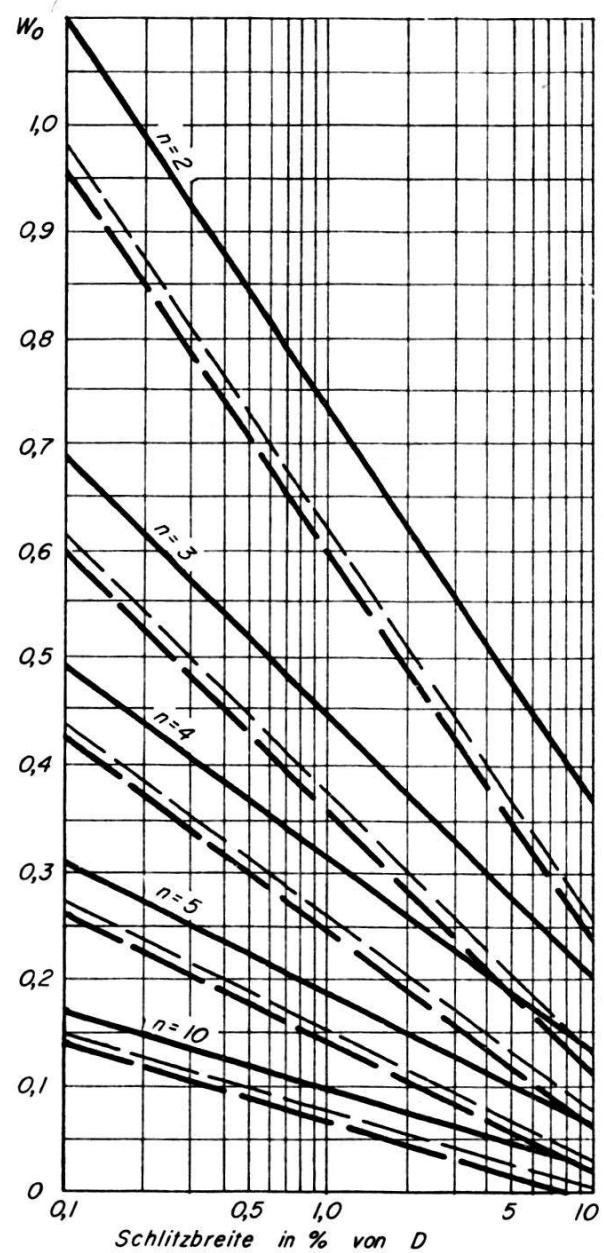
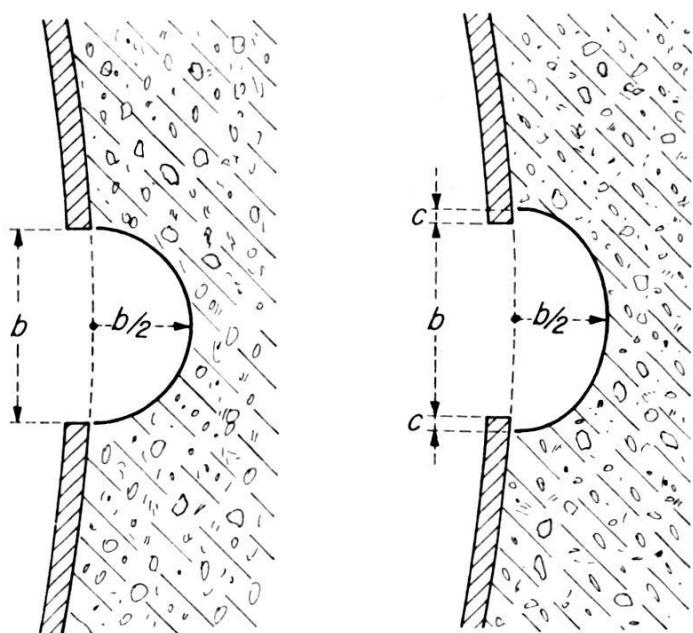


Bild 15
Eintrittswiderstand ohne Ausschlämmung (voll ausgezogen),
mit kreisförmiger (schwach strichliert)
und mit elliptischer (stark strichliert)
Ausschlämmung

Der umgekehrte Vorgang der Ausschlämmung, welcher um die Eintrittsöffnungen Hohlräume schafft, ist die Einschlämmung oder das mechanische Eindringen von Bodenteilchen in die Eintrittsöffnungen. Dies bewirkt nun eine Widerstandserhöhung im gleichen Ausmaß. Es ergibt sich daraus die praktische Forderung, die Rohre nicht verschmutzt und ohne unnötiges Anpressen an das umgebende Erdreich zu verlegen.

Filter, welche den 10- bis 100fachen k -Wert gegenüber dem umgebenden Bodenmaterial aufweisen, haben innerhalb des Eintrittsbereiches eine radikale Wirkung auf die Zuströmung. Bild 16 zeigt den errechneten Strömungsverlauf bei einem Filter mit 10fachem k -Wert. Da dasselbe Rohr wie in Bild 5 für die Berechnung angenommen wurde, ist ein Vergleich möglich. Der Randeinfluß durch die Eintrittsöffnungen geht fast völlig verloren, und gegen den Filter hin entsteht praktisch die Zuströmung zu einem volldurchlässigen Rohr, also nahezu eine Radialströmung.

Tabelle 2 zeigt die Herabsetzung des Rohrwiderstandes W_0 bei Rohren der Nennweite 40 und bei Verwendung von dünnen Glasvliesen in Modellversuchen nach [2]. (Die W_0 -Werte oberhalb der Trennlinie in der Tabelle sind mit Vorbehalt aufzunehmen, da sie vielleicht nicht bei radialen Randbedingungen ermittelt wurden. In diesem Falle stehen sie hier nur als Vergleichswerte.)

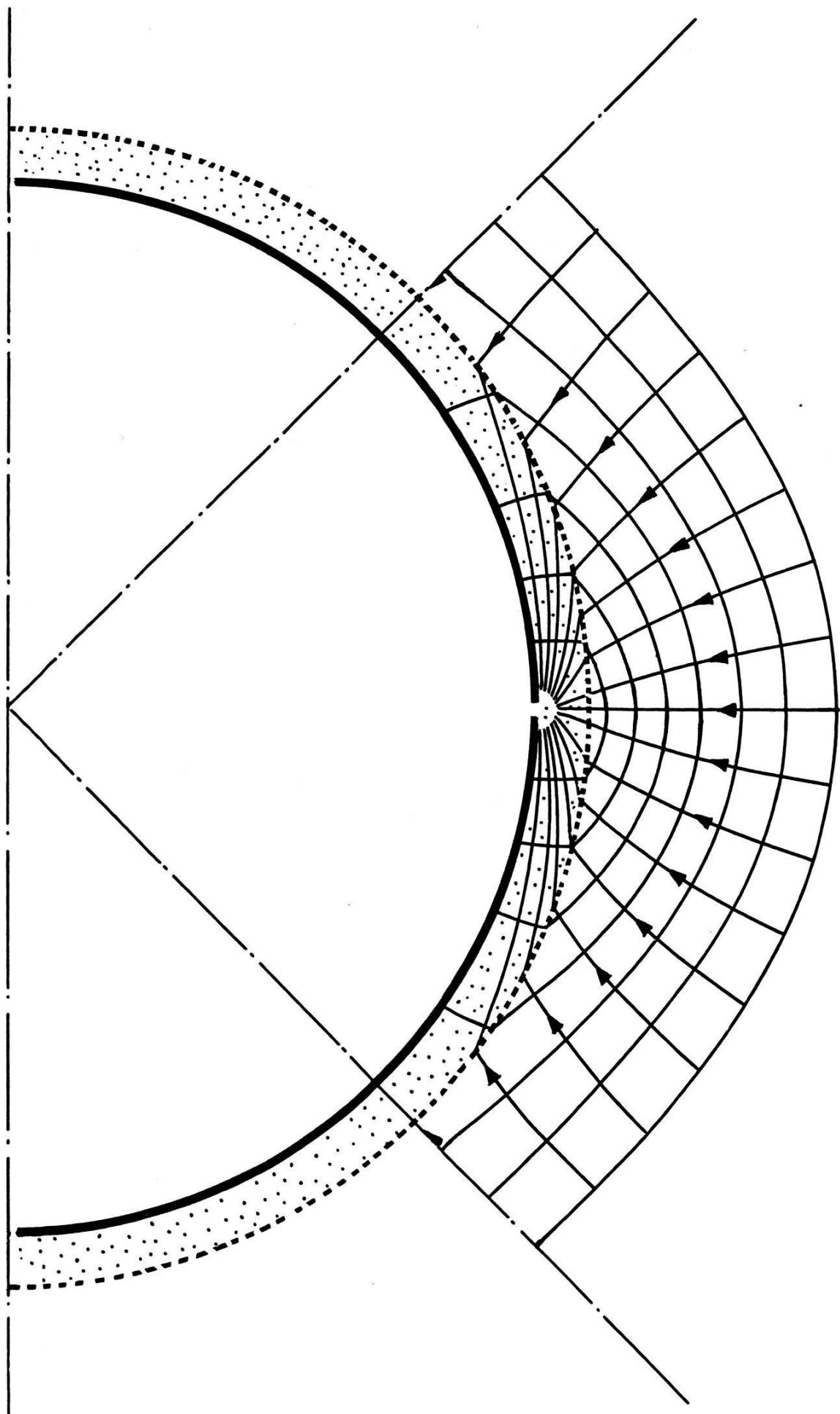
Tabelle 2: Einfluß von Glasvliesfilter auf den Rohrwiderstand W_0 (nach Cavelaars)

| Rohr | Anzahl Schlitze pro lfm | Eintrittsfläche cm^2 | ohne Filter W_0 | mit Filter W_0 |
|---------------------------------------|-------------------------|-------------------------------|-------------------|------------------|
| Glatt | 60 | 9,0 | 1,5 | 1,1 |
| | 56 | 7,7 | 1,5 | 1,1 |
| | 24 | 3,3 | 2,5 | 1,3 |
| | 16 | 2,2 | 3,4 | 1,4 |
| | 8 | 1,1 | 5,0 | 1,6 |
| Gewellt (3 Reihen) | 155 | 7,0 | 1,0 | 0,7 |
| Gewellt (6 Reihen) | 650 | 7,8 | 0,4 | 0,02 |
| Tonrohr (NW 50) ~ 3-mm- Fuge | 3 | 19,8 | 1,8 | 0,15 |

Wesseling [22] und *Boumans* [1] geben bei Verwendung von Filtern und bei radialer Zuströmung W_0 -Werte in der Größenordnung von $-0,05$ bis $+0,15$ an.

Die Untersuchungen gehen weiter, und es sei hier nur darauf hingewiesen, daß der Filter schon rein hydraulisch ein sehr wirksames Mittel zur Hebung der Drainrohrzuströmleistungen darstellt. Entscheidend dabei ist nicht direkt der höhere k -Wert des Filtermaterials, sondern die Änderung der Randbedingung innerhalb des Eintrittsbereiches. Auch

Bild 16: Zuströmung zu geschlitztem Rohr mit Filter (gerechnet) ➤



hier wiederum hat der umgekehrte Vorgang, nämlich eine Verdichtung innerhalb des Eintrittsbereiches, besonders krasses Folgen.

Dasselbe, was über Filter gesagt wurde, gilt natürlich auch für eventuell lockeres Grabenfüllmaterial, welches das Rohr umgibt.

Der Einfluß des Rohrdurchmessers bei geschlitzten Rohren

Nach Gleichung (4) ist der Radialwiderstand W_R als Funktion des Rohrdurchmessers R_0 umgekehrt proportional dem Wert von $\ln R_0$, wobei das Rohr als volldurchlässig angesehen wird. Aus Gleichung (5) geht hervor, daß bei geschlitzten Rohren (R_0) ein zusätzlicher Eintrittswiderstand W_0 auftritt, welcher mit R_0 direkt proportional verknüpft ist. Es interessiert nun, in welcher Abhängigkeit bei geschlitzten Rohren (Anzahl der Schlitzreihen gleich n) die Summe aus Radial- und Eintrittswiderstand (W) vom Rohrradius steht. Vergleicht man zwei Rohre mit den Radien R_a und R_b , wobei $R_a < R_b$, so gibt Gleichung (5):

$$\Delta W = W_a - W_b = -\frac{1}{2\pi} \cdot \ln \frac{R_b}{R_a} + \frac{1}{n\pi} \cdot \ln \frac{R_b}{R_a}$$

und weiter:

$$-\Delta W = \frac{n-2}{2n\pi} \cdot \ln \frac{R_b}{R_a} \quad (6)$$

Die Gleichung gilt, wenn $(b \cdot n)/R_0 < 1,4$, was für alle handelsüblichen Rohre zutrifft, für eine Schlitzreihenanzahl $n \neq 1$ und nur dann, wenn für alle Rohrradien gleiche Schlitzbreiten b angenommen werden. Da sie aus einer zweidimensionalen Betrachtung des Problems entstand, ist sie um so genauer, je größer bei konstanter Schlitzbreite b die Eintrittsfläche ist, das heißt große Schlitzlängen oder große Schlitzanzahl m pro Laufmeter Rohr. Näheres bezüglich dieser Bedingungen siehe [23].

Gleichung (6) gibt den Hinweis, daß bei Verwendung von geschlitzten Rohren der Eintrittswiderstand durch Verwendung von größeren Rohrdurchmessern und sonst gleicher Rohrgeometrie praktisch nicht verringert wird, und zwar dies um so weniger, je kleiner die Schlitzreihenanzahl n ist. Bei $n = 2$ ist $-\Delta W$ gleich Null. Bild 17 zeigt diese Abhängigkeit graphisch.

Der Rohrwiderstand im Vergleich zu den übrigen hydraulischen Widerständen

Wir fanden für derzeit handelsübliche Rohrtypen W_0 -Werte zwischen 0,5 und 2,0, für Tonrohre von etwa 2,0. Es fragt sich nun, in welchem Größenverhältnis diese Werte zu den übrigen hydraulischen Widerständen im Boden stehen und ob eventuell Verbesserungen der W_0 -Werte durch günstigere Schlitzanordnung, durch Verwendung von Filtern oder sonstigen

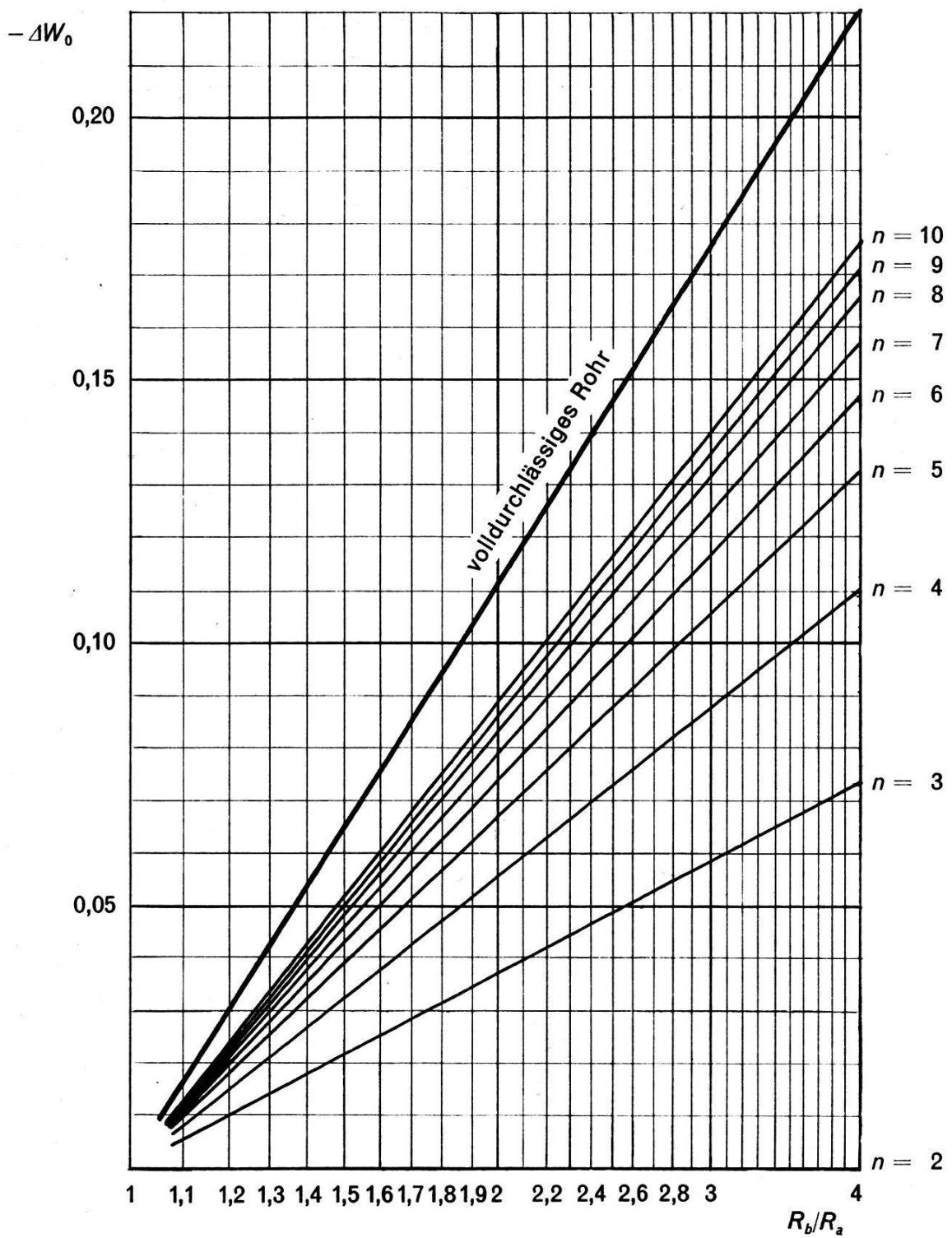


Bild 17: Der Eintrittswiderstand bei geschlitzten Rohren in Abhängigkeit vom Rohrdurchmesser

Einfluß innerhalb des Eintrittsbereiches wegen der weitaus größeren restlichen Widerstände gar nicht mehr ins Gewicht fallen. Dies wäre zu erwarten, wenn man rein flächenmäßig den Gesamtströmungsbereich einer Drainage mit dem hier entwickelten Eintrittsbereich vergleicht. Bei

einem Drainabstand von 15 m, einer undurchlässigen Schichte 3 m unter der Bodenoberfläche und einem Kunststoffrohr der Nennweite 50 mit 4 Schlitzen beträgt zum Beispiel der Eintrittsbereich nur rund 2% des gesamten Strömungsbereiches von Drainmitte zu Drainmitte.

Zur Beantwortung der oben gestellten Frage greifen wir auf die Drainformel von *Hooghoudt* zurück, welche sich auf Rohre mit $W_0 = 0$ bezieht. Die in Frage stehenden Widerstände werden wieder auf den k -Wert = 1 bezogen. Sie sind dann nur von der Geometrie der äußeren Randbedingungen abhängig und seien als *Außenwiderstände* (W_A) bezeichnet. Vorerst sei der Fall betrachtet, bei welchem die undurchlässige Schichte so tief ($t_2 > E/4$) liegt, daß sicherlich noch radiales Zuströmen an die äußeren Grenzen des Eintrittsbereiches hin besteht. Die entsprechenden Außenwiderstände wurden für 50 mm Draindurchmesser für verschiedene Drainabstände E in Tabelle 3 zusammengestellt. Die Prozentzahlen ergeben sich bei Annahme eines Drainrohres mit dem Rohrwiderstand $W_0 = 1$.

Tabelle 3: Außenwiderstand im Vergleich zum Rohrwiderstand $W_0 = 1$

| E m | W_A -«Radial» | | W_0 | | $(W_A + W_0)$ -«Radial» | |
|----------|-----------------|------|-------|------|-------------------------|-----|
| | | % | | % | | % |
| 7,5 | 1,23 | 55,1 | 1,00 | 44,9 | 2,23 | 100 |
| 10,0 | 1,32 | 56,9 | 1,00 | 43,1 | 2,32 | 100 |
| 15,0 | 1,45 | 59,2 | 1,00 | 40,8 | 2,45 | 100 |
| 20,0 | 1,54 | 60,6 | 1,00 | 39,4 | 2,54 | 100 |
| 25,0 | 1,62 | 61,8 | 1,00 | 38,2 | 2,62 | 100 |
| 30,0 | 1,68 | 62,8 | 1,00 | 37,2 | 2,68 | 100 |

Aus Tabelle 3 kann man die überraschende Feststellung machen, daß, tiefe Lage der undurchlässigen Schichte vorausgesetzt, der Rohrwiderstand etwa in der gleichen Größenordnung wie der Außenwiderstand liegt. Die Prozentsätze in Tabelle 3 ändern sich nicht mit dem k -Wert. Solange eine Entwässerung mittels Rohrdrainagen anwendbar ist, sind demnach auch Bestrebungen, den Widerstand im Eintrittsbereich herabzusetzen, sinnvoll.

Die radiale Zuströmung zum Eintrittsbereich wird durch eine undurchlässige Schichte mit $t_2 < E/4$ oder durch seichte Drainlage, $t_1 \rightarrow D$, gestört, weiter für den im Bergland sehr häufig auftretenden Fall der Zuströmung zu einem Drainagestrang in geneigtem Gelände (Bild 18).

In diesem Falle gelten die angegebenen W_0 - und W_A -Werte nicht mehr, und die Zusammenhänge werden komplizierter. Während jede Abweichung von der Radialströmung zu einem volldurchlässigen Rohr nur eine Zunahme des Widerstandes bedeuten kann (Nachweis mittels Fourier-Reihen siehe [19]), muß dies für den Eintrittswiderstand des Rohres nicht unbedingt zutreffen. Das Verhältnis zwischen W_0 und W_A verschiebt sich je nach Geometrie der nunmehrigen Randbedingungen. In der Drain-

praxis ist wohl fast immer ein Anwachsen von W_A gegenüber W_0 zu erwarten. Ob dann noch der Aufwand für eine Herabsetzung des Rohrwiderstandes lohnend ist, wird von Fall zu Fall verschieden sein. Es können darüber noch keine näheren Angaben gemacht werden.

Bild 19 zeigt die Potentialverteilung für die äußere Randbedingung «Drainagegraben», wie sie mit Hilfe eines Elektrolyttanks ermittelt wurden (Grabenbreite = 40 cm, Grabentiefe = 120 cm, Rohrmitte 6,5 cm über der Sohle, NW = 50 mm).

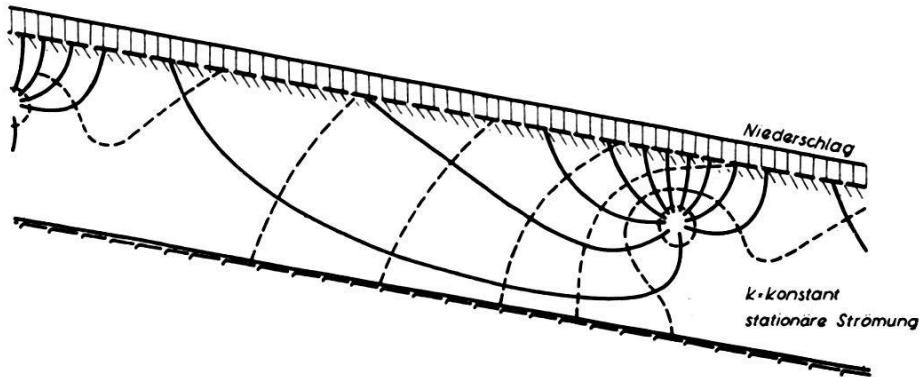


Bild 18: Strömungsbild bei einem Drainagestrang in geneigtem Gelände (nach Gustafsson, siehe auch [8])

Dieser Fall wird angenähert dann auftreten, wenn der k -Wert im Drainagegraben etwa das Zehn- und Mehrfache des k -Wertes des umgebenden Bodens beträgt. Für denselben Drainagegraben wurden ebenfalls am elektrischen Modell für einen Rohrtyp in verschiedenen Höhen über Grabensohle die Rohrwiderstände sowie die Außenwiderstände gemessen. Die Ergebnisse sind zusammen mit den ursprünglichen, radialen W_0 -Werten, die ihre Bedeutung als hydraulischer Kennwert eines Rohres beibehalten, in Tabelle 4 zusammengestellt.

Tabelle 4: Rohr- und Außenwiderstand bei äußerer Randbedingung «Drainagegraben» (Bild 19) für ein Rohr NW 50 mit 4 Schlitzreihen und $W_0 = 1,2$ (äußere Randbedingung «Radial»).

| Drainmitte über Sohle [cm] | Lage der Schlitzebenen zur Sohle | W_0 -«Drain» | | W_A -«Drain» | | $(W_0 + W_A)$ -«Drain» | |
|----------------------------|----------------------------------|----------------|----|----------------|----|------------------------|-----|
| | | | % | | % | | % |
| 2,5 | parallel | 1,3 | 30 | 3,0 | 70 | 4,3 | 100 |
| 6,5 | parallel | 1,1 | 28 | 2,8 | 72 | 3,9 | 100 |
| 13,0 | parallel | 1,1 | 29 | 2,7 | 71 | 3,8 | 100 |
| 2,5 | Ø | 1,2 | 29 | 3,0 | 71 | 4,2 | 100 |
| 6,5 | Ø | 1,1 | 28 | 2,8 | 72 | 3,9 | 100 |
| 13,0 | Ø | 1,1 | 29 | 2,7 | 71 | 3,8 | 100 |

Die Werte in Tabelle 4 sind noch nicht voll gesichert, geben aber auf jeden Fall mit den Werten in Tabelle 3 eine gute Vergleichsmöglichkeit.

Der W -Wert bei Flach- und Berglandentwässerung

Es soll noch ein Hinweis auf die verschiedene Bedeutung der vorhin angegebenen W_0 -Werte bei Flach- und Berglandentwässerung (die Unter-

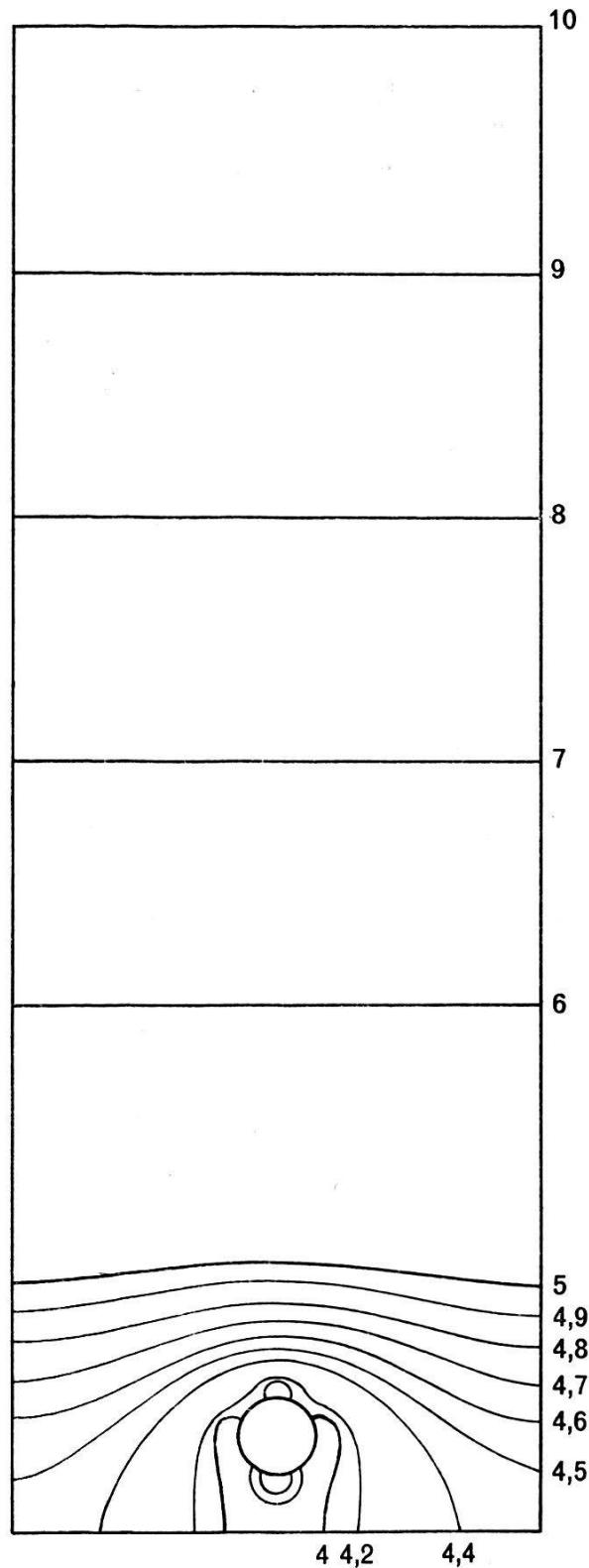


Bild 19: Potentialverteilung bei Zuströmung zu einem Rohr mit 4 Schlitzreihen bei der äußeren Randbedingung eines Drainagegrabens. Die Zahlen geben Potentialwerte an (Bodenoberfläche bei 10)

scheidung ist hier sehr allgemein gefaßt) folgen. Dabei wird wieder statio-
närer Zustand vorausgesetzt (Zufluß von außen ist gleich Zuströmmenge
zum Rohr), eine Einschränkung, welche für eine streng theoretische Un-
tersuchung nicht zulässig wäre. Für eine prinzipielle Darstellung des Zu-
sammenhangs zwischen Strömungswiderstand, Lage des Grundwassers-
piegels und zuströmender Wassermenge ist dies jedoch ohne Bedeutung.

Die Beziehung der oben angegebenen Faktoren wird hergestellt durch
die schon bekannte Gleichung

$$W = \Delta h/Q,$$

wofür auch im speziellen Fall geschrieben werden kann:

$$\frac{\Delta h_1}{Q_1} = W_1 = c_1$$

c_1 ist dabei eine Konstante. Wird nun W_1 um einen Betrag ΔW (zum
Beispiel durch Änderung von W_0) zu W_2 geändert, so ändert sich ent-
sprechend c_1 zu c_2 .

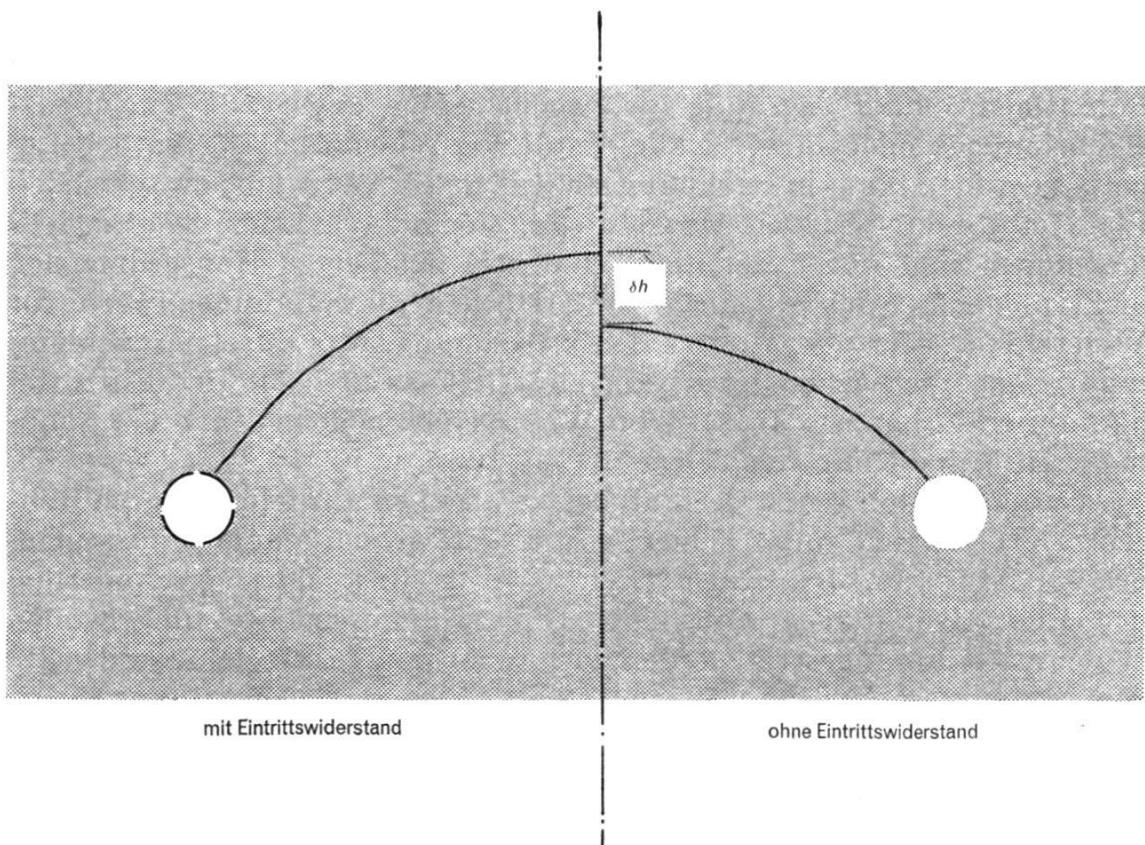


Bild 20: Absenkung des Grundwasserspiegels (nach Boumans)

Diese Änderung kann auf zwei Wegen erfolgen, welche zwei völlig ver-
schiedenen hydrologischen Systemen in der Natur entsprechen.

1. Der in Rechnung zu stellende *Zufluß* Q von außen bleibt *konstant*
(langandauernder, gleichmäßiger Niederschlag; Schmelzwasser). In die-

sem Falle wird sich Δh ändern, und zwar umgekehrt proportional zu ΔW (Steigen oder Fallen des Grundwasserspiegels).

Dieses System tritt vorwiegend im Flachland auf, wo relativ geringe Regenintensitäten (in Holland zum Beispiel rechnet man meist mit 7 mm/Tag, was ca. 1 l/s · ha entspricht) rechnungsmäßig abzuführen sind und wo eine Absenkung des Grundwasserspiegels angestrebt wird.

2. Die *Druckhöhe* von außen bleibt praktisch *konstant* (gespanntes Grundwasser, Hangdruckwasser, Druckwasser von Vorflutern, Quellen). Hier wird sich die Zuströmmenge Q umgekehrt proportional zu ΔW ändern. Dieses System entspricht Bedingungen, die häufig im Bergland auftreten und wo es oft entscheidend ist, größeren Wassermengen Q (2–10 l/s · ha) die Zuströmung zum Drainagerohr zu ermöglichen.

Grenzbereich der Aussagen

In den vorangegangenen Abschnitten wurden wesentliche Grundlagen der Zuströmung zu einem Drainagerohr angedeutet und die Bedeutung des Eintrittsbereiches hervorgehoben. Es sei daran erinnert, daß den theoretischen Betrachtungen sowie den elektrischen Analogmessungen die Potentialströmung zugrunde lag, welche keine eventuelle Turbulenzerscheinungen oder andere als hydraulische Widerstände (eventuell Beisetzungswiderstand) in Rechnung stellt. Direkte Vergleiche zwischen den Elektrolyttankmessungen des Autors mit den holländischen Sandmodellmessungen sind wegen der nicht eindeutig definierten Rohrgeometrien nicht möglich. Nach Angaben von [1] liegen die Sandmodellwerte für Widerstände eher etwas unter den errechneten, was durch Ausschlammung oder auch schon Lockerung des Gefüges in Nähe der Eintrittsöffnung erklärbar ist. Zusätzliche Widerstände scheinen bei den Sandmodellen keine Rolle zu spielen.

Weitaus komplexer ist der Fall bei Vergleichen mit feldverlegten Rohren. Dort dürften unter anderem die Verlegebedingungen ausschlaggebend dafür sein, ob die theoretischen Werte, die ja ohne Verschmierung der Eintrittsöffnungen und ohne Dichtschlämmen des umgebenden Bodenmaterials angesetzt werden, mehr oder weniger erreicht werden [2]. Von Einfluß ist auch die Durchlässigkeit des verfüllten Rohrgrabens. Diese wird sich mit der Zeit ändern. Je höher sie gegenüber dem festen Bodenmaterial liegt, um so geringer ist in der Praxis die Bedeutung, die der Geometrie des Drainagerohres zukommt. Feldbeobachtungen sind für Vergleichszwecke in dieser Hinsicht noch erforderlich.

Auch anderweitig warten noch Aufgaben. Das Zusammenwirken von Rohr und Filter ist noch nicht gänzlich geklärt. Bei Behandlung der Berglandentwässerung wäre es wichtig, den Zusammenhang zwischen den dort auftretenden äußeren Randbedingungen (undurchlässige Schichten, Hangneigung), wie sie zum Beispiel für offene Drainagegräben von *Richard* [18, 20] systematisch erfaßt werden, und den Rohrrandbedingungen zu finden.

Verwendete Symbole

| | | |
|-----------------------|---|-------------------------------------|
| <i>D</i> | Drainerohrdurchmesser | [m] |
| <i>R</i> | Radius | [m] |
| <i>NW</i> | Nennweite | [m] |
| <i>E</i> | Drainabstand | [m] |
| <i>W</i> | Widerstand | [s/m ²] |
| <i>Q</i> | Wassermenge | [m ³ /sec] |
| <i>Φ</i> | Potential | [m ² /sec ²] |
| <i>Δh</i> | Druckhöhe | [m] |
| <i>v</i> | Geschwindigkeit | [m/sec] |
| <i>k</i> | Durchlaßfaktor | [m/sec] |
| <i>t</i> ₁ | Draintiefe (Bodenoberfläche bis Drainrohrmitte) | [m] |
| <i>t</i> ₂ | Tiefe der undurchlässigen Schichte unterhalb Drainrohrmitte | [m] |
| <i>b</i> | Schlitz- oder Fugenbreite | [m] |
| <i>l</i> | Schlitzlänge | [m] |
| <i>d</i> | Lochdurchmesser von Eintrittsöffnungen | [m] |
| <i>f</i> _l | Eintrittsfläche eines Schlitzes beziehungsweise Loches | [m ²] |
| <i>n</i> | Schlitzreihenanzahl | |
| <i>m</i> | Schlitz pro Laufmeter Rohr und pro Schlitzreihe | |
| <i>c</i> | Konstante | |
| <i>G</i> | Index für Grenze | |
| <i>R</i> | Index für Radial | |
| <i>S</i> | Index für Schlitz | |
| <i>0</i> | Index für Rohr beziehungsweise auch Eintrittsöffnung | |

Literatur

- [1] *Boumans, H.* (1963): Over instroming en aanstroming bij drainbuizen zonder en met afdekking. *Culturt. Tijdschrift* 2, 218–229.
- [2] *Cavelaars, C.* (1962): Stroming van water naar drains. *Tijdschrift der Kon. Nederl. Heidemaatschapij* 73, 391.
– (1965): Hydrological aspects of the application of plastic drain pipes and filter materials. Research Dept., Kon. Nederl. Heidemaatschapij, privat.
- [3] *Dachler, R.* (1936): *Grundwasserströmung*. Wien 1936.
- [4] *Donat, J.* (1935): Die Strangentfernung bei Dränungen in Mineralböden. *Wasserwirtschaft und Technik*, 207–211.
- [5] *Engelund, F.* (1953): On the laminar and turbulent flows of groundwater through homogenous sand. *Trans. Dan. Akad. of Techn. Sci.*, Nr. 3.
- [6] *Ernst, L.* (1954): Het berekenen van stationaire grondwaterstromingen welke in een vertikal vlak kunnen worden afgebeeld. *Landbouwk. Proefstr. en Bodenk. Inst. T. N. O.*, Groningen (mimeographed).
- [7] *Feichtinger, F.* (1966): Die Wasseraufnahmefähigkeit der Dränrohre. *Österr. Wasserwirtschaft* 11/12.
- [8] *Grubinger, H.* (1962): Über Bodenentwässerung. *Schweizerische Zeitschrift für Vermessung, Kulturtechnik und Photogrammetrie*, 4.
- [9] *Gustafsson, Y.* (1946): Die Strömungsverhältnisse in gedräntem Boden. *Acta Agr. Suecana* II, 1.
- [10] *Hooghoudt, S.* (1940): Bijdagen tot de kennis van enige natuurkundige groot-heden van de grond. *Versl. Landb. Onerz.* 46, 515–707.

- [11] *Jager, A. De* (1960): Diameter en perforatie van plastic drainbuizen. *De Ingenieur* 72B, 167–172.
 - [12] *Kirkham, Don* (1950): Potential flow into circumferential openings in drain tubes. *J. of Agr. Phys.* 21, 655–660.
 - [13] *Kirkham, Don; Schwab, G.* (1951): The effect of circular perforations on flow into subsurface drainage tubes. *Agr. Eng.* 32, 270–274.
 - [14] *Kowald, R.* (1965): Die Feuchtigkeitsausdehnung von Tondränenrohren. *Zeitschrift für Kulturtechnik und Flurbereinigung* 1, 36–43.
 - [15] *Kozeny, J.* (1933): Über den Wasserzudrang bei Dränenfugen. *Wasserkraft und Wasserwirtschaft* 28, 13–17.
 - [16] *Luthin, J. N.* (1953): An electric resistance network solving drainage problems. *Soil Sci.*, Vol. 75, 4, 259–274.
 - [17] *Luthin, J. N.; Gaskell, R. E.* (1950): Numerical solutions for tile drainage problems. *Soil Sci.*, Vol. 75, 4, 259–274.
 - [18] *Luthin, J. N.; Richard, F.* (1965): Zur Untersuchung der Wasserbewegung in Hangböden mit unvollkommener Durchlässigkeit. *Schweizerische Anstalt für das forstliche Versuchswesen, Mitt.*, Vol. 41, Heft 6.
 - [19] *Muskat, M.* (1946): Flow of homogeneous fluids through porous media. *Ann Arbor, Michigan*.
 - [20] *Richard, F.* (1964): Der Bodenwasserhaushalt, Sorption und Desorption in schwer durchlässigen Böden. *Schweizerische Zeitschrift für Vermessung, Kulturtechnik und Photogrammetrie*, Heft 5.
 - [21] *Wesseling, J.* (1959): Enige resultaten van het onderzoek naar de perforatie van plastic drainbuizen. *Inst. voor Cult. en Waterhuish-Wageningen* (Mimeograph report).
 - [22] *Wesseling, J.; Homa, F.* (1964): Entrance resistance of plastic drain tubes. *Inst. voor Cult. en Waterhuish-Wageningen* (privat).
 - [23] *Widmoser, P.* (1966): Potentialströmung zu geschlitzten Rohren. *Schweizerische Bauzeitung* 52, 913–919.
-

Mitteilung

Von der anlässlich der Hauptversammlung 1966 in Vaduz herausgegebenen Festschrift

«*Vom Fürstentum Liechtenstein
und dem St.-Galler Rheintal*»

sind noch einige Exemplare vorhanden.

Zu beziehen zu Fr. 20.– bei Hans Braschler, dipl. Ing., Myrtenstraße 8, 9010 St. Gallen.

(Vgl. Besprechung in Nr. 11 vom 15. November 1966 in dieser Zeitschrift.)
