Zeitschrift: Schweizerische Bauzeitung

Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine

Band: 86 (1968)

Heft: 9

Artikel: Der Einfluss von Zonen geänderter Durchlässigkeit im Bereich von Drain- und Brunnenfilterrohren

Autor: Widmoser, P.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-69992

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: 15.07.2025

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

HERAUSGEGEBEN VON DER VERLAGS-AKTIENGESELLSCHAFT DER AKADEMISCHEN TECHNISCHEN VEREINE, ZÜRICH

Der Einfluss von Zonen geänderter Durchlässigkeit im Bereich von Drain- und Brunnenfilterrohren

Von **P. Widmoser**, Institut für Kulturtechnik, ETH, Zürich

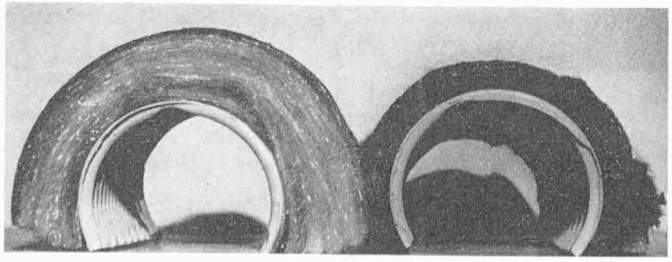
Teilergebnis aus den Arbeiten am Forschungsauftrag «Kunststoffrohre in der Bodenentwässerung», erteilt vom Eidg. Meliorationsamt im Eidg. Volkswirtschaftsdepartement, 1965

Verwendete Symbole

B	Breite	[m]	[cm]
L	Länge	[m]	[cm]
Fl	Fläche	[m²]	[cm²]
TF	Trennfläche	[m²]	
D	Durchmesser	[m]	[cm]
R	Radius	[m]	[cm]
T	Tiefe	[m]	[cm]
d	Dicke der Fremdzone	[m]	[cm]
b	Schlitzbreite	[m]	[cm]
l	Schlitzlänge	[m]	[cm]
s	Steglänge	[m]	[cm]
m	Schlitzanzahl pro lfm		
n	Anzahl der Schlitzreihen		
Re	Reynoldssche Zahl		
F	Funktion		
G	Geometrie		
Δ	Differenz		
φ	Potential	[m²/s²]	
Z	Komplexes Potential		
Q	zuströmende Wassermenge	[m³/s]	
W	Widerstand	[s/m²]	[s/cm²]
v	Filtergeschwindigkeit	[m/s]	[cm/s]
ν	kinematische Zähigkeit	[m²/s]	
k	Durchlässigkeitsfaktor	[m/s]	[cm/s]
$\varkappa$	Verhältnis der Leitfähigkeit der Fremdzone zur Leitfähigkeit des Bodens		
B	Index für Boden		
E	Index für Eintritt		
F	Index für Fremdzone oder Filter		
V	Index für Verdichtung		
G	Index für Grenze		
m	Index für Mittel		
0	Index für Rohr		
K	Index für Korn		

Bei der Zuströmung zu Drain- oder Brunnenfilterrohren treten Rohrwiderstände auf, welche vom Rohrdurchmesser sowie von der Art und Verteilung der Eintrittsöffnungen am Rohr abhängig sind. Sie wurden bereits theoretisch behandelt [5], [14]. Die Eintrittsfläche beträgt bei handelsüblichen Drainrohren nur etwa 0,5 bis 1% der Wandfläche, bei Brunnenfiltern 4 bis 6%. Dabei können bei Entwässerungssystemen Rohreintrittswiderstände von der Grössenordnung der restlichen Bodenwiderstände auftreten [15].

Bild 1. Glaswollfilter im Lieferzustand (links) und verlegt (rechts), nach Kowald (Universität Giessen)



Da der Bereich um das Rohr auf Grund der geometrischen Verhältnisse hydraulisch entscheidend ist, beeinflusst jede Änderung in diesem Bereich die Zuströmung zum Rohr besonders stark. Zur Erhöhung der Durchlässigkeit und damit der Eintrittsleistung werden im Rohrbereich Filter aus Kies, Schlacke, Torf, Tannenreisig, Glaswolle, Glasvlies, Styromull usw. eingebaut (Bild 1). Bei unsorgfältiger Verlegung kann sogar eine Verdichtung und damit eine Verringerung der Durchlässigkeit auftreten.

In dieser Abhandlung wird die hydraulische Auswirkung von Zonen geänderter Durchlässigkeiten theoretisch untersucht. Die Gültigkeit der Aussagen setzt eine Strömung nach den Gesetzen der Potentialtheorie sowie Homogenität und Isotropie innerhalb der zwei betrachteten Bereiche voraus. Der Bereich, welcher sich in seiner Durchlässigkeit vom Bodenmaterial unterscheidet, wird als Fremdzone bezeichnet.

In der Nähe der Eintrittsöffnungen nimmt die Filter- bzw. Porengeschwindigkeit des Wassers zu. Diese verteilt sich nicht gleichmässig über den Schlitz- oder Lochquerschnitt (sie ist in der Mitte der Eintrittsöffnung kleiner als in Randnähe). Dadurch kann es in manchen Bodenarten zu unerwünschten Einschlämmungen von Bodenteilchen in das Rohr kommen, Bilder 2 und 3. Die mechanische Siebwirkung von Filterstoffen ist nicht Gegenstand dieser Arbeit. Sie hängt nur insofern mit diesem zusammen, als für die Siebwirkung kleine Porendurchmesser des Filters, für die hydraulische Wirkung jedoch grosse Porendurchmesser (bzw. hohe Durchlässigkeit) wünschenswert erscheinen. Die noch sinnvolle obere Grenze der Durchlässigkeit vom hydraulischen Standpunkt aus wird festgelegt.

1. Die mittlere Durchlässigkeit in Systemen mit senkrecht angeströmten Trennflächen bei Parallel-, Radial- und Einzeldrainströmung

In Bild 4 ist eine Parallelströmung durch ihre Strom- und Äquipotentiallinien dargestellt. Das durchströmte System $(L_B + L_F)$ zerfällt in einen Bereich L_B mit der Durchlässigkeit k_B und eine Fremdzone L_F mit der Durchlässigkeit k_F, wobei $k_B < k_F$ (Filter) ist. Im Strömungsbild zeigt sich die Zone grösserer Durchlässigkeit durch das Auseinanderrücken der Äquipotentiallinien. In dieser Zone wird ein kleinerer Druckgradient zur Förderung derselben Wassermenge Q über den Querschnitt B benötigt als in der Zone L_F. Stationärer Zustand ist dabei vorausgesetzt.

Jeder Bereich für sich ist *homogen* (d. h. der k-Wert ist unabhängig vom Ort) und *isotrop* (d. h. der k-Wert ist unabhängig von der Strömungsrichtung). Das gesamte System hingegen ist inhomogen und anisotrop, wobei diese Eigenschaften freilich nur auf die Trennfläche TF beschränkt bleiben. Man bezeichnet solche Systeme auch quasihomogen.

Bilder 2 und 3. Ausschlämmung (hell) aus einem Sandgemisch (70 % Kristallquarzsand 0,5—0,75 mm, 30 % Quarzmehl etwa 0,04 mm). Vergrösserung 5fach

Bild 2. Ohne Filter

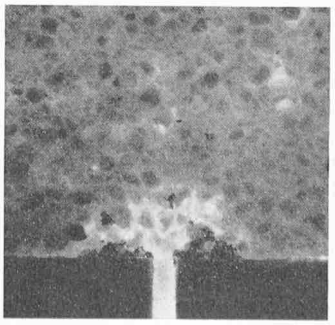
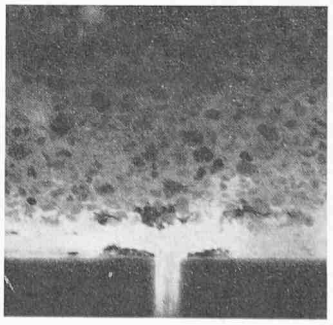


Bild 3. Mit Filter aus Glasvlies, 1,0 mm stark (heller Streifen)



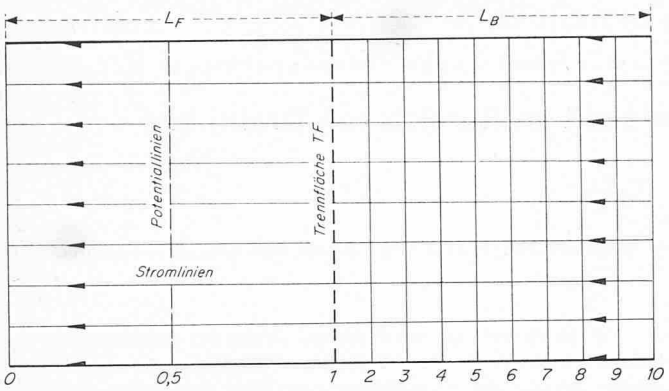


Bild 4. Parallelströmung mit Fremdzone. Trennfläche senkrecht angeströmt

Bei senkrechtem Anströmen an die Trennfläche und Parallelströmung berechnet man die mittlere Durchlässigkeit des Systems nach (1), (siehe u. a. [11], Gl. 11.11):

$$k_m = \frac{L_B + L_F}{\frac{L_B}{k_B} + \frac{L_F}{k_F}} \,. \tag{1}$$

Der Übergang von der beschriebenen Parallelströmung zu einer Radialströmung (Bild 5) lässt sich mit Hilfe der komplexen Transformationsgleichung $Z_R = \ln Z_P$ leicht herstellen, und Gleichung (1) lautet dann, wiederum senkrechtes Anströmen der Trennfläche vorausgesetzt:

$$k_m = \frac{\ln\left(\frac{R_B}{R_0}\right)}{\frac{\ln\left(\frac{R_B}{R_F}\right)}{k_B} + \frac{\ln\left(\frac{R_F}{R_0}\right)}{k_F}} \tag{2}$$

wobei R für den Radius, R_0 insbesondere für den Rohrradius steht.

Schliesslich sei noch die Gleichung für die Zuströmung zu einem im Boden verlegten Einzeldrain (Bild 6) angeführt. Sie wurde nach [6], Gleichung 34, abgeleitet und lautet:

$$k_m = \frac{\ln A}{\frac{\ln B}{k_B} - \frac{\ln (A/B)}{k_F}} \,, \tag{3}$$

wobei

$$A = 1 + \frac{T_0}{R_0} - \sqrt{\left(\frac{T_0}{R_0}\right)^2 + 2\left(\frac{T_0}{R_0}\right)}$$

$$B = 1 + \frac{T_B}{R_F} - \sqrt{\left(\frac{T_B}{R_F}\right)^2 + 2\left(\frac{T_B}{R_F}\right)} \,.$$

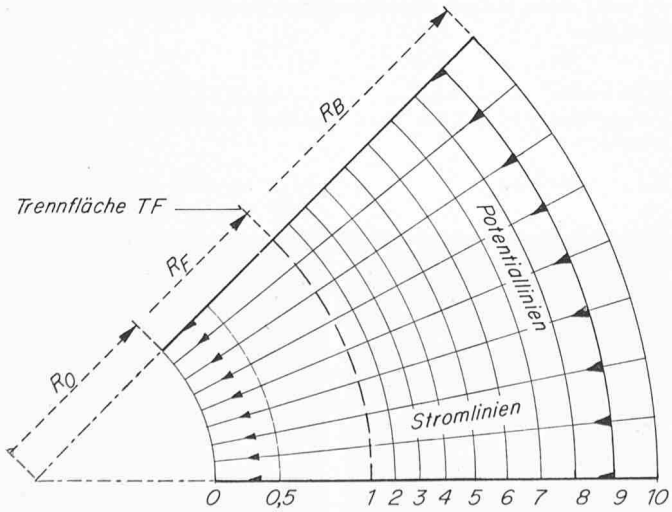


Bild 5. Radialströmung mit Fremdzone. Trennfläche senkrecht angeströmt

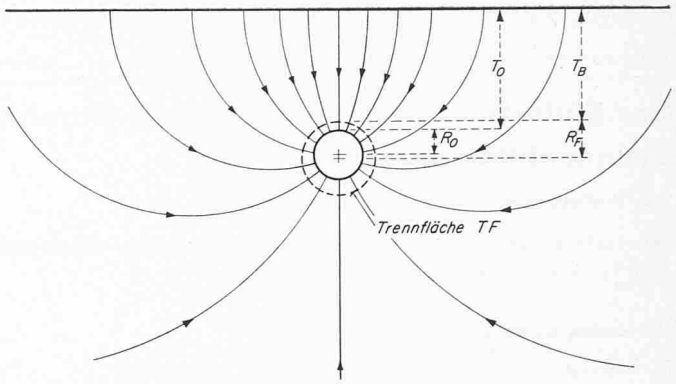


Bild 6. Strömung zu Einzeldrain mit Fremdzone. Trennfläche senkrecht angeströmt

Darin bedeuten

T_0 senkrechter Abstand von der Bodenoberfläche bis zum oberen Rohrrand

T_B senkrechter Abstand von der Bodenoberfläche bis zum oberen Filterrand

R_F Radius der äusseren Begrenzung der Fremdzone

R_0 Rohrradius

Anmerkung. Um der Formel streng zu entsprechen, müsste der Mittelpunkt der kreisförmigen Trennfläche jeweils unterhalb des Rohrmittelpunktes liegen (Bild 6). Praktisch ist diese Exzentrizität vernachlässigbar, wenn R_F klein im Verhältnis zu T_0 ist.

Beispiele. In den Tabellen 1 bis 3 sind Werte der mittleren Durchlässigkeit k_m für das Verhältnis Bodenbereich zu Bereich Fremdzone von 90:10 und 99:1 angegeben. Δk% ist die Änderung der Durchlässigkeit in Prozenten der ursprünglichen Durchlässigkeit. Die Tabellen zeigen den Einfluss des k-Wertes in der Fremdzone, der Dicke

Tabelle 1. Parallelströmung, senkrecht angeströmte Trennfläche, $L_B + L_F = 100$ cm

k_F/k_B	L_B cm	L_F cm	k_m/k_B	Δk %	L_B cm	L_F cm	k_m/k_B	Δk %
0,01	90	10	0,100	—90,0	99	1	0,505	—49,5
0,10	90	10	0,550	—45,0	99	1	0,918	— 8,2
10,00	90	10	1,089	+ 8,9	99	1	1,009	+ 0,9
100,00	90	10	1,099	+ 9,9	99	1	1,010	+ 1,0

Tabelle 2. Radialströmung, senkrecht angeströmte Trennfläche, $R_B - R_0 = 100$ cm, $R_0 = 2{,}5$ cm, $R_B = 102{,}5$ cm, $R_F = 12{,}5$ bzw. 3,5 cm

k_F/k_B	$R_B - R_F$ cm	$R_F - R_0$ cm	k_m/k_B	Δk %	$R_B - R_F$ cm	$R_F - R_0$ cm	k_m/k_B	Δk %
0,01	90	10	0,023	—97,7	99	1	0,100	—90,0
0,10	90	10	0,204	—79,6	99	1	0,551	—44,9
10,00	90	10	1,640	+64,0	99	1	1,089	+ 8,9
100,00	90	10	1,750	+75,0	99	1	1,099	+ 9,9

Tabelle 3. Strömung zu Einzeldrain, senkrecht angeströmte Trennfläche $T_0 = T_B + d_F = 100$ cm, $R_0 = 2{,}5$ cm, $R_F = 12{,}5$ bzw. 3,5 cm

k_F/k_B	T_B cm	d_F cm	k_m/k_B	Δk %	T_B cm	d_F cm	k_m/k_B	Δk %
0,01	90	10	0,027	—97,3	99	1	0,122	—87,8
0,10	90	10	0,233	—76,7	99	1	0,605	—39,5
10,00	90	10	1,491	+49,1	99	1	1,070	+ 7,0
100,00	90	10	1,568	+56,8	99	1	1,077	+ 7,7

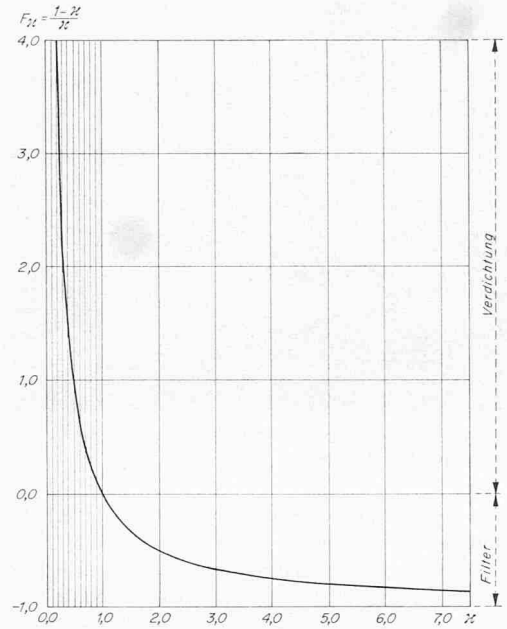


Bild 7. Funktion $F = (1 - \varkappa)/\varkappa$

der Fremdzone und der Anströmungsform (Geometrie der Randbedingungen).

2. Die Widerstände

Die mittlere Durchlässigkeit in einem System steht mit dessen Widerständen in direktem Zusammenhang. Diese werden im folgenden näher definiert. Allgemein gilt für zwei Punkte, welche auf einem Stromfaden liegen:

$$(4) \qquad (\varphi_2 - \varphi_1) = Q \int_1^2 \frac{1}{k} \vec{v}_e \, d\vec{l} = Q\, W,$$

wobei v_e die Strömungsgeschwindigkeit bei $Q = 1$ angibt. Diese Gleichung ist analog dem Ohmschen Gesetz $U = IR$. Die Potentialdifferenz $(\varphi_2 - \varphi_1)$ ist demnach, wenn k unabhängig von Ort und Richtung ist, proportional einem Widerstandsfaktor W. Dieser wird bestimmt von k und den geometrischen Verhältnissen (G) des Strömungsbereiches (z. B. Parallel-, Radial- oder Einzeldrainströmung).

Im speziellen Fall einer radialen Zuströmung zu einem «volldurchlässigen» Rohr der Länge L gilt demnach

$$(5) \qquad W = \frac{1}{k} \frac{\ln\left(\frac{R_B}{R_0}\right)}{2\pi L} \quad [\mathrm{s/m^2}].$$

Wird W auf ein Rohr mit der Länge $L = 1$ und auf eine Durchlässigkeit $k = 1$ bezogen, so ergibt sich eine dimensionslose Widerstandskennzahl $[W]$. Es besteht die Beziehung

$$(6) \qquad W = \frac{[W]}{kL}.$$

Im folgenden werden ohne nähere Kennzeichnung nur dimensionslose Widerstandskennzahlen angegeben. Zur Unterscheidung der verschiedenen Widerstände, welche bei der vorliegenden Arbeit interessieren, gelten nachstehende Bezeichnungen:

W_B der im Boden auftretende Widerstand bei Zuströmung zu einem idealen, volldurchlässigen Rohr

W_0 der am geschlitzten oder gelochten Rohr auftretende Rohrwiderstand (immer positiv)

ΔW_F die durch Einbringen der Fremdzone auftretende, auf den Bodenwiderstand W_B bezogene Änderung des Widerstandes; negativ bei Filtern, positiv bei Verdichtung

W_E der Eintrittswiderstand als Summe des Rohrwiderstandes und der Widerstandsänderung $W_E = W_0 + W_F$.

Anmerkung. $W_E = 0$ bedeutet, dass der Rohrwiderstand durch eine zusätzliche Filterwirkung gerade aufgehoben wird.

3. Änderungen der Widerstände infolge von Fremdzonen

Jede Änderung des Widerstandes W bewirkt bei stationärem Zustand, wie aus Gleichung (4) ersichtlich, entweder eine Änderung des Druckgradienten $\Delta\varphi$ oder der Strömung Q. Welcher der beiden möglichen Fälle eintreten wird, ist umstandsbedingt. Bei gespanntem Grundwasser oder in gesättigten Böden mit einer Wassernachlieferung von aussen (Niederschläge, Quellen usw.), welche grösser als die Abfuhr durch den Drain ist, wird sich z. B. die Wassermenge Q ändern und der Druck des Porenwassers in Rohrnähe annähernd konstant bleiben. In einem Grundwasserträger ohne Zufuhr von aussen (stationärer Zustand besteht nur bei Betrachtung kleiner Zeiträume) wird sich hingegen der Druckgradient ändern, was sich im Heben oder Senken des Grundwasserspiegels auswirkt.

Bei nichtstationären Zuständen werden sich $\Delta\varphi$ und Q um Beträge ändern, welche zwischen den angeführten Extremfällen liegen. Der Druckgradient $\Delta\varphi$ ist direkt, die Wassermenge Q umgekehrt proportional dem Widerstand W. Als gemeinsame Kennzahl für die Änderung des Widerstandes auf Grund einer Fremdzone eignet sich der vorhin definierte Wert ΔW_F, welcher unabhängig von der Grösse des Gebietes ausserhalb der Fremdzone ist. Weiters ist es zweckmässig, in den Gleichungen die Dicke der Fremdzone d sowie das Verhältnis der Durchlässigkeiten $\varkappa = k_F/k_B$ einzuführen.

Es gilt für Verdichtung $0 < \varkappa < 1$

für Filter $1 < \varkappa < \infty$

Damit ergibt sich entsprechend den Gleichungen (1), (2), (3) für die Parallelströmung:

$$(7) \qquad \Delta W_F = \left(\frac{L_F}{k_F} - \frac{L_F}{k_B}\right)\frac{k_B}{B} = \left(\frac{1}{k_F} - \frac{1}{k_B}\right)\frac{d\,k_B}{B} = \frac{1-\varkappa}{\varkappa}\,\frac{d}{B}$$

für die Radialströmung:

$$(8) \qquad \Delta W_F = \frac{1-\varkappa}{\varkappa}\,\frac{\ln\left(\frac{R_0+d}{R_0}\right)}{2\pi}$$

für den Einzeldrain

$$(9) \qquad \Delta W_F = \frac{1-\varkappa}{\varkappa}\,\frac{1}{2\pi}\ln\left[\frac{1+\frac{T_0-d}{R_0+d} - \sqrt{\left(\frac{T_0-d}{R_0+d}\right)^2 + 2\left(\frac{T_0-d}{R_0+d}\right)}}{1+\frac{T_0}{R_0} - \sqrt{\left(\frac{T_0}{R_0}\right)^2 + 2\left(\frac{T_0}{R_0}\right)}}\right].$$

Allgemein gilt weiters als prozentuale Zu- oder Abnahme des Widerstandes:

$$(10) \qquad \Delta W_F\,\% = \pm 100\,\frac{\Delta W_F}{W_B}.$$

Der wiederkehrende Ausdruck $(1 - \varkappa)/\varkappa$ in den Gleichungen (7) bis (9) stellt dabei den Einfluss der verschiedenen Durchlässigkeiten $(F_\varkappa)$ dar, während der zweite Faktor die geometrischen Randbedingungen (G) zum Ausdruck bringt.

Man kann daher auch allgemein schreiben

$$(11) \qquad \Delta W_F = F_\varkappa\, G.$$

Der Typus der Funktion $F_\varkappa = (1 - \varkappa)/\varkappa$ ist in Bild 7 für $k_B = 1$ dargestellt.

Man erkennt, dass bei zunehmender Verdichtung der Einfluss der Durchlässigkeit $(F_\varkappa)$ den geometrischen Anteil (G) sehr rasch überwiegt, bis schliesslich als Grenzzustand eine undurchlässige Randzone gebildet wird, die neue geometrische Verhältnisse darstellt. Bei zunehmender Filterwirkung hingegen nähert sich $F_\varkappa$ asymptotisch dem Wert -1, was im Grenzfall einer Strömung ohne Reibung, allein durch G bestimmt, entspricht. Es fällt auf, dass eine Verdichtung bestimmten Grades den Widerstand mehr erhöht als ein Filter gleichen Grades den Widerstand erniedrigt.

Beispiele

Beim Ziehen eines Maulwurfdrains mit dem Rohrdurchmesser $D = 5{,}0$ cm sei eine Verdichtung durch den Presskörper um das Zehnfache in einem Bereich von 0,25 cm (erster Fall) bzw. 1,25 cm

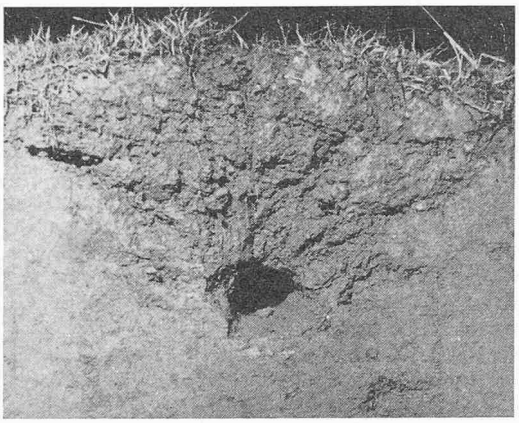


Bild 8. Maulwurfdrain, Querschnitt

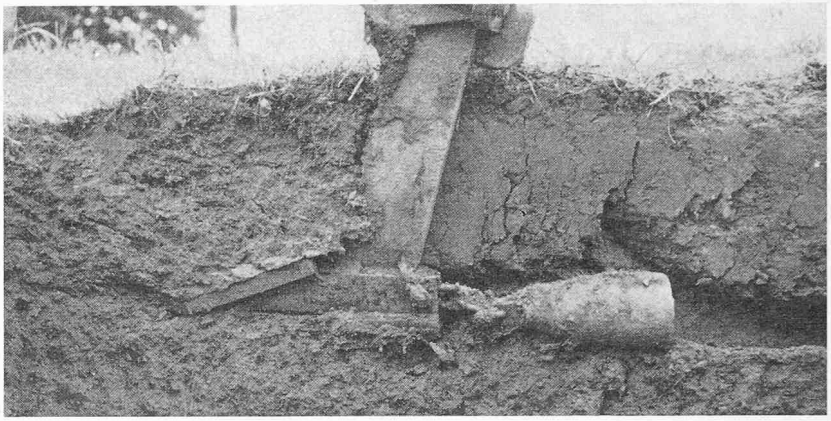


Bild 9. Maulwurfdrain, Längsschnitt (nach Feichtinger, Bundesinstitut für Kulturtechnik und Technische Bodenkunde, 3252 Petzenkirchen, Österreich)

(zweiter Fall) um den Drain angenommen. Die Drainoberkante liegt 0,50 m unter der Bodenoberfläche. Wie gross ist der zusätzlich durch die Verdichtung auftretende Widerstand? Um wieviel Prozent wird sich bei gesättigtem Zustand und bei starken Niederschlägen oder Schneeschmelze die Drainspende verringern?

Aus Gleichung (9) ergibt sich $\Delta W_F = +0{,}06\ (+0{,}26)$ pro Laufmeter Drain (der Wert ist dimensionslos, siehe Abschnitt 2). Kunststoffrohre ohne Filter haben vergleichsweise einen Rohrwiderstand W_0 zwischen 0,5 und 2,0, Tonrohre von 2,0. (Diese Werte wurden auf Grund von Messungen gefunden, bei denen auch die Kontraktion durch die Stege in der Längsrichtung des Rohres — dreidimensionaler Fall — berücksichtigt ist.) Die prozentmässige Verringerung der Drainspende beträgt nach Gleichung (10) im Falle eines Einzeldrains 9,5 (44,0)%. Diese hohen Werte ergeben sich auch dadurch, dass der Bodenwiderstand W_B im Falle eines Einzeldrains in geringer Tiefe und ohne einwirkende undurchlässige Schicht verhältnismässig gering ist und dadurch der Verdichtungswiderstand mehr Gewicht erhält. Im angegebenen Falle ist $W_B = 0{,}595$.

Bei einer Verlegetiefe von $T_0 = 1{,}00$ m steigt bei sonst gleichen Verhältnissen W_B geringfügig auf 0,701, während sich die Werte von ΔW_F noch nicht merkbar ändern. Die Verringerung der Drainspende liegt dann bei 8,0 (37,3)%.

Liegt der Einzeldrain mit seiner unteren Hälfte in einer undurchlässigen Schicht in einer Tiefe von 1,00 m, so steigt W_B auf 1,242 und die Verringerung von ΔW_F fällt entsprechend auf 5,2 (21,0)%. Die Werte liegen sehr ähnlich, wenn keine undurchlässige Schicht die Zuströmung behindert, dafür aber statt eines Einzeldrains eine Reihe paralleler Drains in einem Abstand von 7,5 m angenommen wird.

Anmerkungen. Tatsächlich tritt bei Maulwurfdrains eine Verdichtung wohl nur im unteren Bereich auf, während bei fachgerechtem Einsatz nach oben eine ausgesprochene Lockerungszone gebildet wird (Bilder 8 und 9). Die Werte für W_B wurden nach [2], [6] und aufgrund der Drainformel von *Hooghoudt* berechnet. Weitere Werte aus Gleichung (9) und (10) sind in Bild 10 dargestellt.

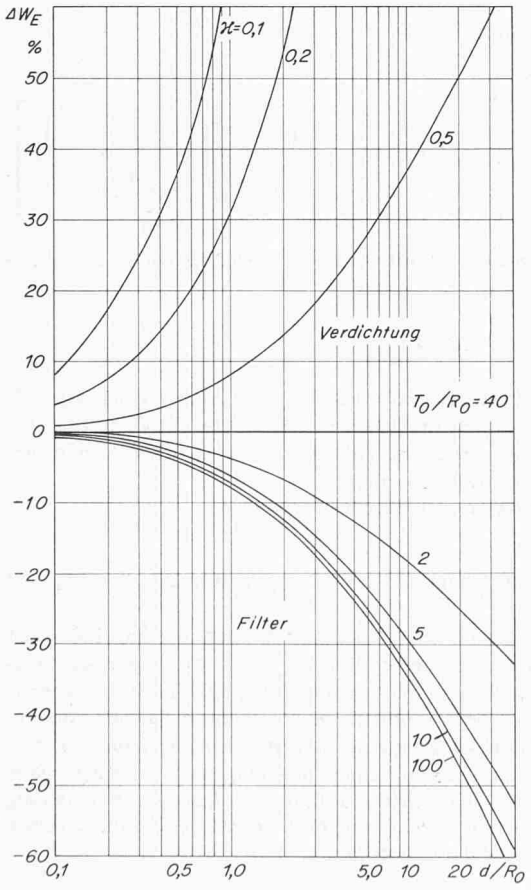


Bild 10. Prozentuale Änderung des Widerstandes bewirkt durch eine Fremdzone bei Einzeldrain mit Rohrwiderstand $W_0 = 0$. Abhängig von der Dicke d und der Durchlässigkeit $\varkappa$

4. Die radiale Zuströmung zu geschlitzten Rohren mit breiten Fremdzonen (zweidimensionaler Fall)

Die radiale Zuströmung zu einem geschlitzen Rohr erfolgt in der zur Rohrachse senkrechten Ebene gemäss Bild 11. Die Schlitze sind dabei unendlich lang gedacht. Man sieht, dass ab einem gewissen Abstand von der Rohrmitte (Grenzradius R_G) der Störeinfluss durch die Schlitze praktisch verschwindet und radiale Zuströmung auftritt. Bei einer Fremdzone, welche das Rohr kreisförmig und nach allen Seiten hin symmetrisch umgibt, wird demnach die Trennfläche TF nur dann senkrecht angeströmt, wenn die Fremdzone eine entsprechende Dicke aufweist, so dass folgende Bedingung erfüllt ist:

$$R_0 + d \geqslant R_G\,. \tag{12}$$

Eine Fremdzone, welche innerhalb des Grenzradius R_G liegt, beeinflusst die Strömungsrichtung in der Nähe der Trennfläche. Auf Grund theoretischer Überlegungen [14] und einer elektrischen Analogmessung [3] ist $R_G = 4{,}6\ R_0$ bei einer zugelassenen Abweichung von der Kreisform um 1% und für ein Rohr mit 4 Schlitzreihen ohne umgebende Fremdzone. Die Schlitzbreiten spielen dabei keine Rolle, solange diese handelsübliche Masse nicht erheblich übersteigen. Näheres ist aus Bild 12 ersichtlich. Diese Festlegung des Grenzradius stellt auch für den dreidimensionalen Fall eine gute Annäherung dar, da das Verhältnis Schlitzlänge zu Steglänge (etwa 1:1) weit grösser ist als das Verhältnis Schlitzbreite zu undurchlässigem Rohrumfang (etwa 1:40).

Theoretisch ist demnach zwischen «dünnen» und «breiten» Fremdzonen zu unterscheiden. Diese finden in der Drainpraxis eine Entsprechung mit dünnen Rohrummantelungen (Glasvlies, Filterschnüre, Glaswolle usw.) und breiten, meist unabhängig vom Rohr verlegten Filterschichten (Kies, Styromull usw.).

Um ein Bild zu bekommen, wie weit Filter die z. T. beträchtlichen Rohrwiderstände verringern oder aufheben, werden im folgenden die Widerstände auf W_E-Werte als Summe von $W_0 + W_F$ (siehe Abschnitt 2) bezogen. Dabei ergibt sich W_0 rechnerisch bei zweidimensionaler Behandlung des Problems aus nachstehender Gleichung ([14], Gl. 8)

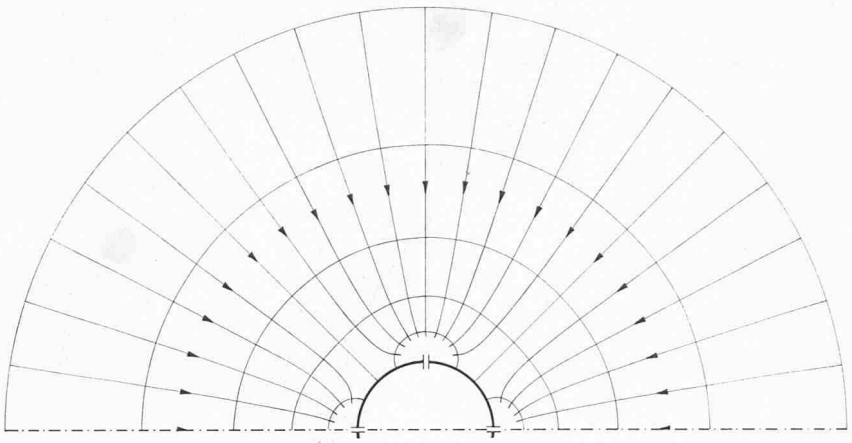


Bild 11. Zuströmung zu geschlitztem Rohr bei durchgehend gedachten Längsschlitzen

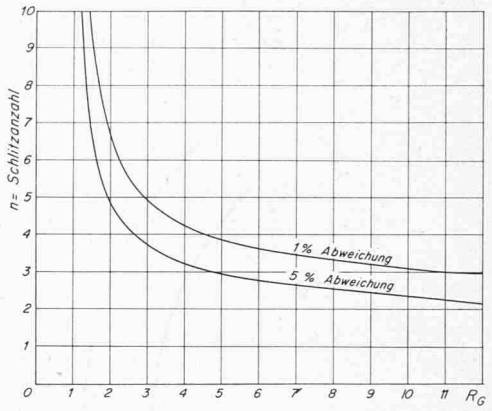


Bild 12. Abstand R_G bei verschiedener Schlitzreihenanzahl (gültig für 0,016 b = 0,200)

$$W_0 = \frac{1}{n\pi} \ln \frac{4 R_0}{n b} \qquad \text{mit} \tag{13}$$

b = Schlitzbreite im Bogenmass, bezogen auf den Einheitsradius. Durch Multiplikation mit dem effektiven Rohrradius ergibt sich die effektive Schlitzbreite, $b = 0{,}032$ entspricht bei einem Rohrradius von 2,5 cm einer Schlitzbreite von 0,08 cm

n = Anzahl der gleichmässig über den Rohrumfang verteilten Schlitze

Die W_E-Werte wurden unter Annahme radialer Zuströmung nach Gleichung (14) berechnet, welche nur für breite Fremdzonen gültig ist.

$$W_E = \frac{\ln\left(\frac{4 R_0}{n b}\right)}{n\pi} + \left(\frac{1-\varkappa}{\varkappa}\right)\left[\frac{\ln\left(\frac{4 R_0}{n b}\right)}{n\pi} + \frac{\ln\left(\frac{R_0 + d}{R_0}\right)}{2\pi}\right]. \tag{14}$$

In Bild 13 sind W_E-Werte abhängig von der Schlitzanzahl n und von $\varkappa$ dargestellt, wobei die Filterstärke konstant $d = 4 \cdot R_0$ ist. Man sieht, dass eine Erhöhung des $\varkappa$-Wertes über 20 keine Herabsetzung des Widerstandes mehr bringt (Ausnahme $n = 2$) und dass bei steigendem $\varkappa$-Wert der Einfluss der Rohrgeometrie immer geringer und bei $\varkappa = 100$ bedeutungslos wird.

5. Die Zuströmung zu geschlitzten Rohren mit dünner Fremdzone (zweidimensionaler Fall)

Ist die Bedingung von (12) nicht erfüllt, so erfolgt die Anströmung der Trennfläche nicht senkrecht. Trennflächen, welche schräg angeströmt werden, stellen bei der Lösung der Laplace-Gleichung, durch welche Potentialströmungen beschrieben sind, eine zusätzliche Randbedingung dar. Diese muss wiederum den Kontinuitätssatz und die Bedingung der Wirbelfreiheit erfüllen. In Vektorform bedeutet dies für isotrope Bereiche:

$$(\vec{v}_F - \vec{v}_B)\, \vec{dF} = 0 \quad \text{und} \quad \text{rot}\, \vec{v} = 0\,.$$

Daraus folgt das bekannte Brechungsgesetz (Optik). Jede Änderung der Strömungsverhältnisse in einem Bereich ruft eine Änderung im anderen Bereich hervor; die Bereiche beeinflussen sich gegenseitig (vgl. Bilder 4 und 14).

Wird im besonderen Fall die Trennfläche senkrecht (die Trennfläche ist gleichzeitig eine Potentialfläche) angeströmt, so bleibt die Richtung des Vektorfeldes vor und nach der Trennfläche gleich, wovon bisher Gebrauch gemacht wurde.

Die Lösung der Laplace-Gleichung mit der zusätzlichen Randbedingung erfolgte durch schrittweise Annäherung an die exakte Lösung bis zur gewünschten Genauigkeit. Die Methode wird nachstehend kurz beschrieben.

Das Rechenverfahren

Die zweidimensionale Zuströmung zu geschlitzten Rohren wird zunächst mit Hilfe der komplexen Abbildungsfunktion

$$Z_p = \frac{Q}{k n \pi} \operatorname{arsinh}\left(\frac{Z_s^{n/2} - Z_s^{-n/2}}{2 \sin\left(\frac{n b}{4}\right)}\right) \tag{15}$$

in eine Parallelströmung umgewandelt [14]. In der Parallelebene entspricht die linke Begrenzung in Bild 14 dem Schlitz, die rechte einer ursprünglich kreisförmigen Potentiallinie mit φ = konstant. Die ursprünglich kreisförmige Trennlinie wird als Kurve TF' abgebildet, wobei sich diese mit zunehmendem Abstand von der Rohrwand einer Geraden nähert (breiter Filter). Man legt nun über diesen Parallelstreifen ein rechteckiges Gitter aus achsparallelen Geraden. Die Funktionswerte sind dann nur in Gitterpunkten definiert. Für jeden dieser Punkte wird eine Differentialgleichung aufgestellt. Den Gitterpunkten am linken Rand (Schlitz) wird hier der Wert $\varphi = 0{,}0$, jenen am

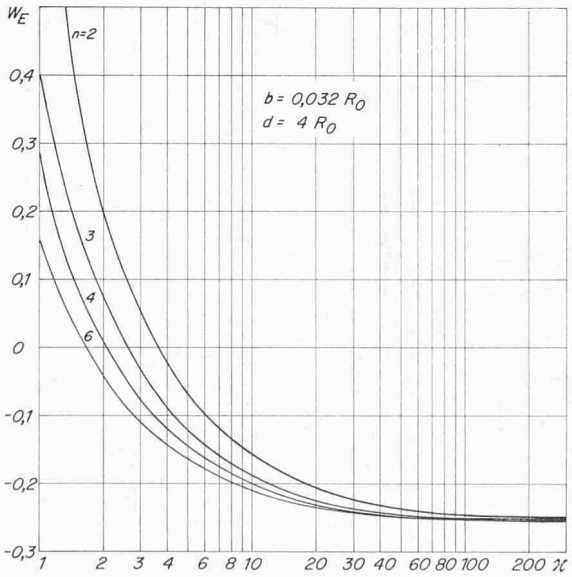


Bild 13. Eintrittswiderstände für dicke Filter ($d = 4\,R_0$), abhängig von der Schlitzreihenanzahl n und der Filterdurchlässigkeit

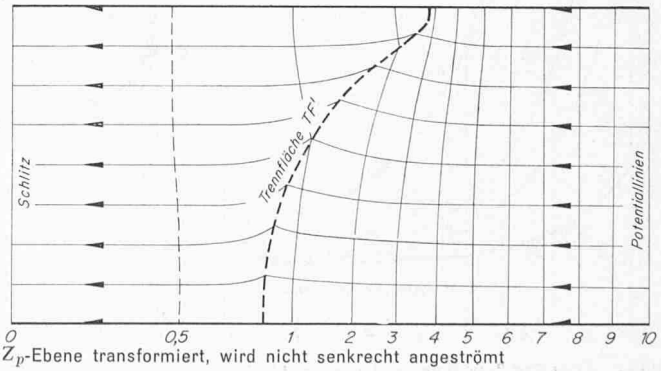


Bild 14. Parallelströmung mit Fremdzone. Trennfläche, aus Z_s-Ebene in

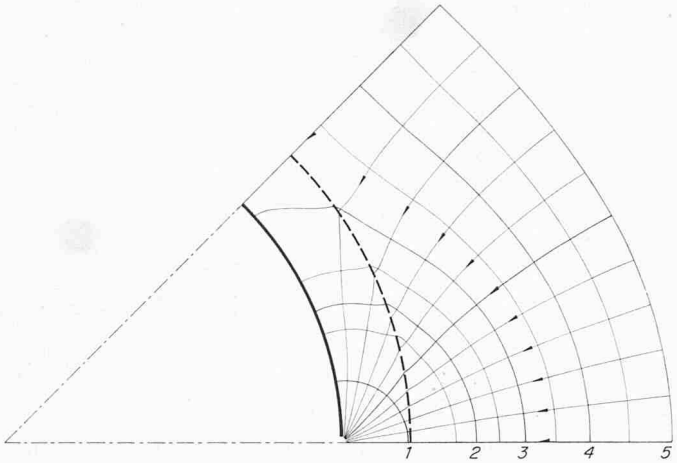


Bild 15. Strömungsbild zu einem geschlitzten Rohr mit dünnem Filter; $n = 4$, $b = 0{,}032$, $d = 0{,}2\,R_0$, $\varkappa = 10$, $l = \infty$

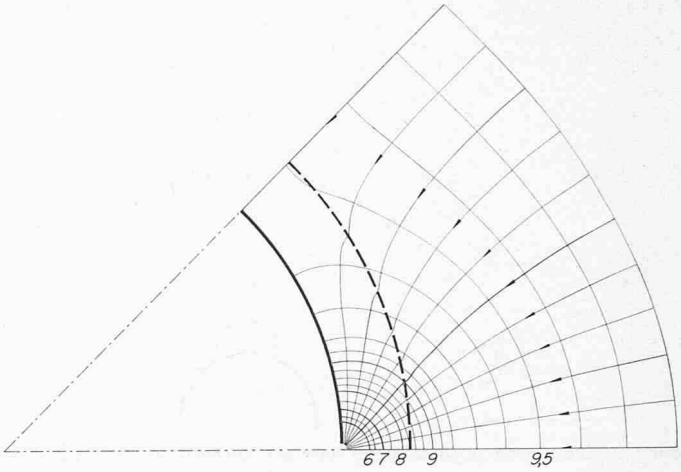


Bild 16. Strömungsbild zu einem geschlitzten Rohr mit dünner Verdichtungszone; $n = 4$, $b = 0{,}032$, $d = 0{,}2\,R_0$, $\varkappa = 0{,}1$, $l = \infty$

rechten Rand der Wert $\varphi = 10{,}0$ zugeordnet. Die Aufteilung der dazwischenliegenden Potentialwerte proportional zu den Durchlässigkeiten rechts und links von TF' ist einfach, wenn TF' zunächst durch eine Gerade angenähert wird. Diese Aufteilung führt dann zu den sogenannten Startwerten für die folgenden Iterationen. Bei der schrittweisen Annäherung an die nur punktweise bestimmte Kurve TF' lässt sich die Energiemethode [10], Seite 182, benützen. Dabei werden die einzelnen Punktwerte mit den jeweiligen Werten der Nachbarpunkte durch einen Operator verknüpft. Dieser muss auch die Verteilung der Gewichte auf Grund der verschiedenen Durchlässigkeiten besorgen. Die numerische Berechnung wurde auf der elektronischen Rechenanlage CDC 1604-A im Rechenzentrum der ETH in Zürich durchgeführt. Bei einen Gitter mit etwa 20000 Punkten und durchschnittlich 10 Iterationen benötigt die Maschine mit einer gewählten Genauigkeit der Endwerte von 1% etwa 2 Minuten Rechenzeit. Die nachfolgenden Aussagen sind das Ergebnis dieses Rechenverfahrens.

Die Strömungsbilder eines geschlitzten Rohres ($n = 4$, $b = 0{,}032\,R_0$), welches mit einem Filter (Bild 15) bzw. von einer Verdichtungszone (Bild 16) umgeben ist, wurde mit Hilfe eines an der Rechenanlage angeschlossenen Zeichengerätes aufgetragen. Ein Vergleich zwischen Bild 15 und Bild 16 zeigt, dass sich im Fall «Filter» die Strömung im Bereich der Trennfläche eher einer radialen Strömung mit einer gleichmässig verteilten Zuströmmenge annähert, während bei Verdichtung das Gegenteil auftritt. Bei relativ geringer Filterdicke (im Bild 15 $d = 0{,}2\,R_0$) und kleinem $\varkappa$ (in Bild 15 $\varkappa = 10$) ist diese Annäherung an den Radialfall allerdings noch gering, solange bei handelsüblicher Schlitzbreite die Schlitzanzahl 4 nicht überschritten wird.

Weitere Rechenbeispiele zeigten, dass gleichmässiges Anströmen vorwiegend durch höhere Anzahl der Schlitzreihen und grössere Filterdicke, kaum aber durch Steigerung des $\varkappa$-Wertes oder Vergrösserung der Schlitzbreiten innerhalb der üblichen Masse erreicht wird. Man beachte hiezu auch Bild 12. Diese Beobachtung spielt dann eine Rolle, wenn man bei Einschlämmungsgefahr in den Filter die Anströmungsgeschwindigkeit möglichst gleichmässig über die Trennfläche verteilen möchte.

Die Bilder 17 bis 21 geben eine Übersicht über die Abhängigkeit des Eintrittswiderstandes W_E von verschiedenen Parametern für durchgehend gedachte Schlitze und dünne Fremdzonen.

Beispiel.

Gegeben ist ein Rohr nach Bild 22a mit $D = 5{,}0$ cm; $b = 0{,}08$ cm; $n = 4$. Die Schlitzlänge l sei bedeutend grösser als die Steglänge s (hinsichtlich Festigkeit sehr ungünstig, für Plastikrohre siehe [9]). Welche Filterkombinationen sind in der Lage, den Rohrwiderstand zu kompensieren, wenn die Bodendurchlässigkeit 10^{-4} cm/s beträgt?

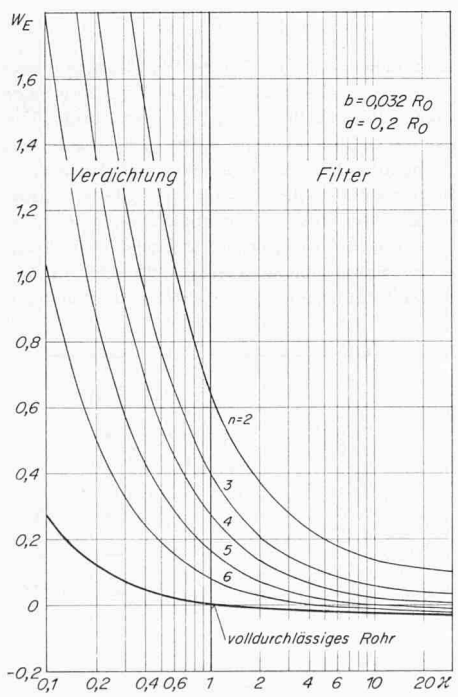


Bild 17. Eintrittswiderstände für dünne Fremdzone, abhängig von der Durchlässigkeit und der Schlitzreihenzahl n; $b = 0{,}032$, $d = 0{,}2\,R_0$, $l = \infty$

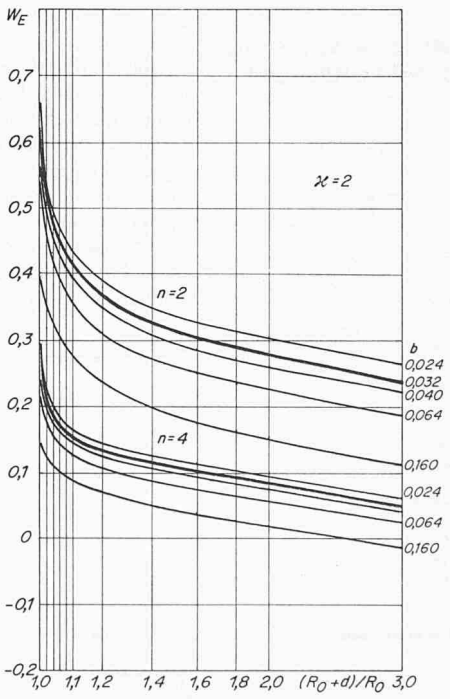


Bild 18. Eintrittswiderstände für dünne Filter, abhängig von der Schlitzbreite b und der Dicke d; $n = 2$ und 4, $\varkappa = 2$, $l = \infty$

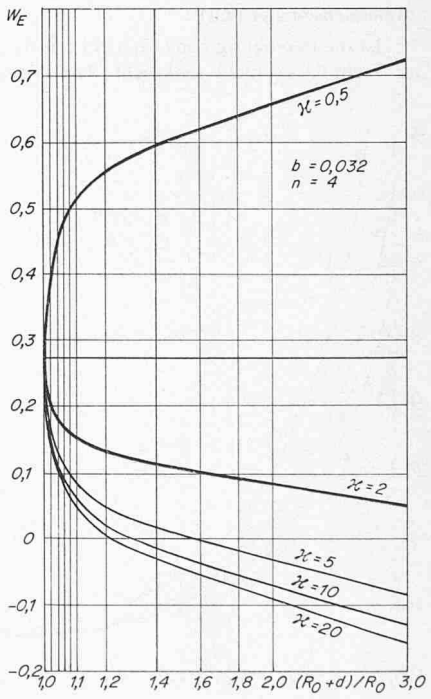


Bild 19. Eintrittswiderstände für dünne Fremdzonen, abhängig von der Durchlässigkeit $\varkappa$ und der Dicke d; $n = 4$, $b = 0{,}032$, $l = \infty$

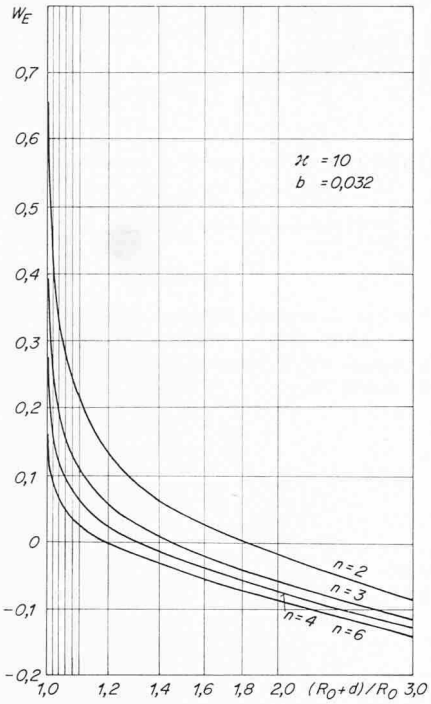


Bild 20. Eintrittswiderstände für dünne Filter, abhängig von der Schlitzreihenanzahl n und der Dicke d; $b = 0{,}032$, $\varkappa = 10$, $l = \infty$

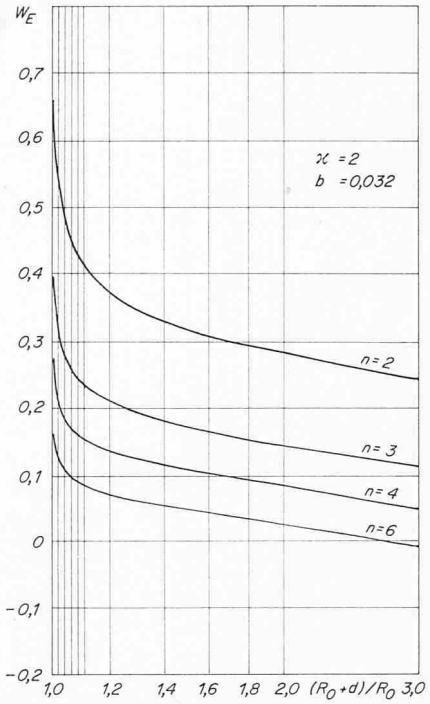


Bild 21. Eintrittswiderstände für dünne Filter, abhängig von der Schlitzreihenanzahl n und der Dicke d; $b = 0{,}032$, $\varkappa = 2$, $l = \infty$

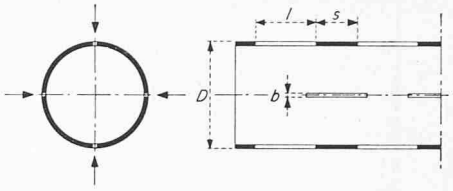


Bild 22a. Glattes Drainrohr mit axialen Schlitzen

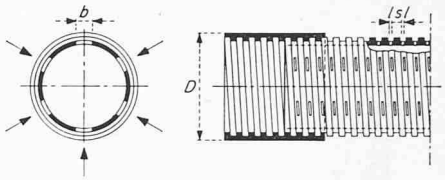


Bild 22b. Drainrohr mit gewindeförmigem Wulst und mit Muffe

Man bezieht zunächst die Schlitzbreite auf den Einheitsradius und erhält $b = 0{,}08/(5{,}0/2) = 0{,}032$. Aus Bild 19 kann man sodann erkennen, dass W_E bei folgenden Kombinationen gleich Null wird.

$\varkappa$	5	10	20
$(R_0 + d)/R_0$	1,56	1,32	1,21

Auf den gegebenen Rohrradius und die gegebene Bodendurchlässigkeit [beachte Gleichung (6)] bezogen, stellen dann die folgenden Kombinationen Lösungen dar:

k_F cm/s	$0{,}5 \cdot 10^{-3}$	$1{,}0 \cdot 10^{-3}$	$2{,}0 \cdot 10^{-3}$
d cm	1,4	0,8	0,5

Es überrascht in diesem Fall die hydraulische Wirksamkeit von bereits sehr dünnen Filtern mit relativ geringer Durchlässigkeit. Aus Bild 17 ist ersichtlich, dass für eine Filterdicke von $0{,}2 \cdot R_0$, d. h. $(R_0 + d)/R_0 = 1{,}2$ eine Steigerung des $\varkappa$-Wertes über 20 praktisch wirkungslos bleibt.

Anmerkung. Im vorigen Beispiel beträgt der durch die Filterwirkung aufzuhebende Rohrwiderstand $W_0 = 0{,}274$ bei theoretisch volldurchlaufenden Schlitzlängen. Bei einem Verhältnis Schlitzlänge l zu Steglänge s (siehe dazu Bilder 22a und 22b) von 1:1 steigt W_0 jedoch auf rund 0,800 [14]. Das entspricht bereits dem Bodenwiderstand eines Einzeldrains, welcher von keiner undurchlässigen Schicht beeinflusst wird (vgl. Beispiel in Abschnitt 3). Das Verhältnis Schlitzlänge zu Steglänge sowie die absolute Grösse der Schlitzlänge ist also von Belang.

6. Abschätzung der Wirksamkeit von Filtern bei dreidimensionaler Betrachtung

Bisher wurde der Einfluss der begrenzten Schlitzlängen, somit der Einfluss der Stege auf den Eintrittswiderstand vernachlässigt. Die Berücksichtigung dieses Einflusses führt zur dreidimensionalen Betrachtung des Problems, welches mathematisch derzeit noch schwierig zu lösen ist. Für diesen Fall wird eine Möglichkeit der Abschätzung gezeigt.

Gleichung (14) behält ihre Gültigkeit bei, wenn in ihr das erste Glied, welches den Rohrwiderstand für durchgehende Schlitze darstellt, durch einen auf irgendeine geeignete Weise bestimmten Wert für nicht-durchgehende Schlitze ersetzt wird, wobei breite Filterzonen vorausgesetzt sind. Einige Lösungen sind für den dreidimensionalen Fall aus Sandmodellversuchen und elektrischen Analogmessungen bekannt [3], [14].

Durch eine Verquickung von theoretisch exakten Lösungen im dreidimensionalen Bereich mit breiten Fremdzonen und im zweidimensionalen Bereich mit breiten und dünnen Fremdzonen ist eine Abschätzung der Eintrittswiderstände für den dreidimensionalen Fall auch mit dünnen Fremdzonen möglich. Dies wird nachstehend für ein Rohr gezeigt mit $D = 5{,}0$ cm; $b = 0{,}08$ cm; $n = 4$; $l = 2{,}5$ cm und einem Verhältnis Schlitzlänge zu Steglänge von 1:1. Aus einer elektrischen Analogmessung [14] ergibt sich $W_0 = 0{,}800$.

Mit Hilfe der Gleichung

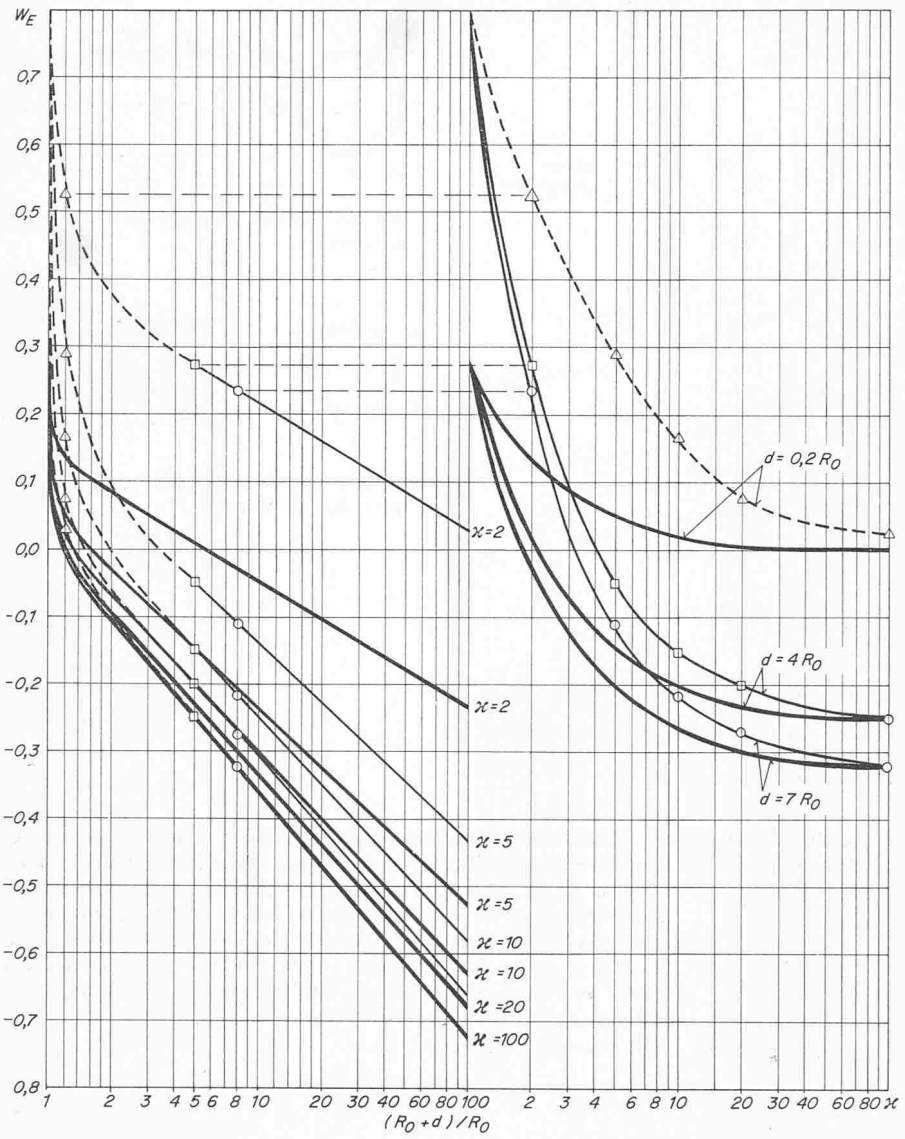
$$W_E = W_0 + \Delta W_F = \tag{16}$$

$$= W_0 + \left(\frac{1-\varkappa}{\varkappa}\right)\left[W_0 + \frac{\ln\left(\frac{R_0+d}{R_0}\right)}{2\pi}\right]$$

werden alle W_E-Werte mit einem Verhältnis $(d + R_0)/R_0 \geqslant 5$ $(d \geq 4\,R_0)$ berechnet, während für ein Verhältnis $(d + R_0)/R_0 \leqslant 5$ die Werte für den zweidimensionalen Fall nach Abschnitt 5 bekannt sind. Alle Kurvenabschnitte in Bild 23, welche sich auf diese Weise aus exakten

Tabelle 4. Durchlässigkeitswerte für verschiedene Materialien

	Filter	
Material	k-Wert [cm/s] $\cdot 10^3$	Literaturangaben
Kies rein	100 000 – 1 000	[11]
Sand rein	1 000 – 1	[11]
Styromull	2 000 – 100	[7]
Glasvlies	200	[1]
Glaswolle	200 – 10	[8]
Weisstorf	10	[8]
	Böden	
Bodenart	k-Wert [cm/s] $\cdot 10^3$	Literaturangaben
lehmiger Sand	10 – 5	[4]
Lehm	5 – 1	[4]
lehmiger Ton	1 – 0,5	[4]
Ton	0,5 – 0,1	[4]
schwerer Ton	0,1 – 0,01	[4]



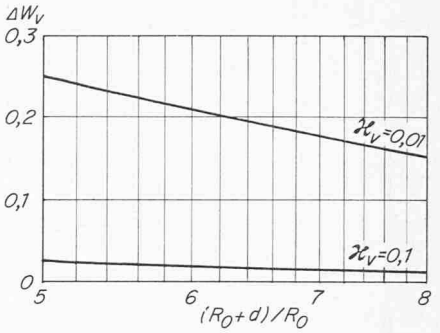


Bild 24. Zusätzliche Widerstände durch Verdichtung für zwei $\varkappa_V$-Werte als Funktion des Abstandes der Verdichtung vom Rohr, $d_V = 0{,}08\ R_0$

Bild 23. Abschätzung des Eintrittswiderstandes für den dreidimensionalen Fall und für ein Rohr mit den Kennwerten: $R_0 = 2{,}5$ cm, $n = 4$, $b = 0{,}08$ cm, $l = 2{,}5$ cm, $l : s = 1:1$. Geschätzte Werte = strichlierte Linien. Berechnete Werte für den zweidimensionalen Fall = dicke Linien. Berechnete Werte für den dreidimensionalen Fall = dünne Linien. Linke Bildhälfte = Eintrittswiderstände für mehrere $\varkappa$-Werte, abhängig von der Filterdicke d (Abszisse). Rechte Bildhälfte = Eintrittswiderstände für drei Filterdicken, abhängig von der Durchlässigkeit $\varkappa$ Punkte mit gleichen Symbolen entsprechen einander in beiden Bildhälften

Werten ergeben, sind voll ausgezogen. Die gestrichelten Linienzüge geben dagegen für den dreidimensionalen Fall geschätzte Kurvenabschnitte wieder.

Aus dieser Abschätzung lassen sich für das gegebene Rohr folgende Schlüsse ziehen:

— bei einem dünnen Filter mit $d \approx 0{,}2\ R_0$ (0,5 cm) und $\varkappa = 100$ ist der Einfluss der Stege bereits vernachlässigbar klein.

— eine geringe Steigerung der Eintrittsleistung ist im Fall eines dünnen Filters auch noch möglich, wenn $\varkappa > 100$ gewählt wird.

— bei dicken Filtern ($d \approx 4\ R_0$) bringt eine Erhöhung von $\varkappa$ über 100 keine Steigerung der Eintrittsleistung mehr.

— ist im konkreten Fall $d = 0{,}7\ R_0 = 17{,}5$ cm, was insgesamt für Rohr und Filter dem Platzbedarf einer Grabenbreite von 40 cm entspricht, so ist bereits bei einem $\varkappa = 40$ keine wesentliche Steigerung der Eintrittsleistung mehr zu erwarten.

Zum Vergleich sind in Tabelle 4 einige Durchlässigkeitswerte nach Literaturangaben, z.T. abgerundet, zusammengestellt. Die Werte stellen nur Richtgrössen dar.

7. Anlagerungen an Filter

Filter, welche gegen Rohrverschlämmung eingesetzt werden, sollen erwartungsgemäss Feststoffteilchen, die einen unerwünschten Korndurchmesser überschreiten, zurückhalten. Die Ablagerungen am oder im Filter wirken ihrerseits wieder als Filter, wobei sich in einer bestimmten Zone immer feinere Teilchen absetzen. Diese Erscheinung ist in der Verfahrenstechnik bekannt. Die Verdichtungszone wird dort als «Filterkuchen» bezeichnet.

Unter der Annahme, dass diese Zone wiederum isotrop und homogen ist und an die Filterzone anschliesst, lassen sich die hydraulischen Auswirkungen analog den bisherigen Überlegungen rechnerisch ermitteln.

Gleichung (16) geht dabei über in

$$W_E = W_0 + \left(\frac{1-\varkappa_F}{\varkappa_F}\right)\left(W_0 + \frac{1}{2\pi}\ln\frac{R_0+d_F}{R_0}\right) + \left(\frac{1-\varkappa_V}{\varkappa_V}\right)\frac{1}{2\pi}\ln\frac{R_0+d_F+d_V}{R_0+d_F} \tag{17}$$

d_F = Filterdicke

d_V = Dicke der Verdichtungszone, welche an die Filterzone anschliesst

$\varkappa_F$ = Verhältnis der Filterdurchlässigkeit zur Bodendurchlässigkeit (k_F/k_B)

$\varkappa_V$ = Verhältnis der Durchlässigkeit der Verdichtungszone zur Bodendurchlässigkeit (k_V/k_B).

Diese Gleichung gilt für radiale Anströmung und dicke Filter, sowie für den dreidimensionalen Fall.

Das letzte Glied in Gleichung (17) stellt den zusätzlichen Eintrittswiderstand durch Verdichtung ($\Delta\ W_V$) dar.

$$\Delta\ W_V = \frac{1-\varkappa_V}{\varkappa_V}\,\frac{1}{2\pi}\ln\frac{R_0+d_F+d_V}{R_0+d_F} \tag{18}$$

W_V-Werte sind in Bild 24 als Funktion des Abstandes der Verdichtungszone vom Rohr dargestellt.

Das in Abschnitt 5 beschriebene Rechenverfahren kann auch für dünne Filter mit anschliessender Verdichtungszone angewandt werden. Die Rechenzeiten liegen dann aber bedeutend höher.

Bild 25 zeigt Eintrittswiderstände bei unendlich lang gedachten Schlitzen ($n = 4$, $b = 0{,}032\ R_0$), abhängig von der Filterstärke mit und ohne Verdichtungszone. Die Verdichtungszone wird dabei wiederum sehr dünn mit $d_V = 0{,}08\ R_0$ angenommen.

Man sieht, dass der Einfluss der Verdichtungszone auf den Eintrittswiderstand bei zunehmender Filterstärke stark abnimmt und unter den genannten Annahmen bei dicken Filtern schon vernachlässigbar klein ist.

8. Anmerkung bezüglich des Auftretens turbulenter Strömung

Bei allen bisherigen Betrachtungen wurde der Einfluss der Turbulenz nicht berücksichtigt. Aus Feldbeobachtungen ist bekannt, dass Turbulenz einen Einfluss auf die Zuströmung zu Brunnenfilterrohren haben kann. Die turbulente Strömung bleibt dabei auf eine relativ enge Zone um das Rohr beschränkt, senkt aber dennoch die Zuströmmenge beträchtlich [12]. Theoretische Überlegungen wurden diesbezüglich ohne Einschluss von Filterzonen angestellt [5]. Turbulenz tritt in Grundwasserströmungen auf, wenn die Reynoldszahl $R_e = v\, D_K/\nu$ annähernd 4 ist. Dabei ist v die Filtergeschwindigkeit, D_K der Korndurchmesser und ν die kinematische Zähigkeit (etwa 0,0135 für Wasser bei 20°) [5].

Bei geschlitzten oder gelochten Rohren mit Filtern können zwei Faktoren die Entstehung turbulenter Strömung begünstigen: 1. Die Erhöhung der Filtersgeschwindigkeit v aufgrund der geometrischen Verhältnisse in Rohrnähe tritt zusammen mit einer Vergrösserung des Korndurchmessers D_K auf, wodurch Re den kritischen Wert erreichen kann. Dabei ist zu beachten, dass die höhere Durchlässigkeit in der Filterzone an sich keine Steigerung der Filtergeschwindigkeit bewirkt (Kontinuitätsgleichung). 2. Turbulenz könnte auch infolge Brechung der Stromlinien an der Trennfläche auftreten (vgl. Bilder 15 u. 16). Grösse und Art des Einflusses der Brechung auf die Turbulenz scheint aber noch nicht geklärt zu sein. Turbulenz ist unerwünscht, da sie die Eintrittsleistung verringern und die Einschlämmung fördern kann. Bezüglich der Eintrittsleistung ist daher zu empfehlen, die Durchlässigkeit der Filterstoffe ($\varkappa$-Werte), welche ja in direktem Zusammenhang mit D_K stehen, nicht übermässig zu erhöhen und die früher angegebenen Grenzwerte als Höchstwerte anzusehen.

9. Zusammenfassung

Die Aussagen gelten für Potentialströmungen in einem gesättigten System Boden-Filter-Eintrittsöffnung, wobei das gesamte System annähernd radial angeströmt wird.

Die Zuströmverhältnisse und Widerstände, welche an Drain- oder Brunnenfilterrohren auftreten, können durch Fremdzonen weitgehend beeinflusst werden. Dabei treten als wirksame Parameter auf: der Rohrradius R_0, die Geometrie und Anordnung der Schlitze (Anzahl n pro lfm, Schlitzbreite b, Schlitzlänge l, die Steglänge s), die Dicke d der Fremdzone sowie das Verhältnis $\varkappa$ (Durchlässigkeit in der Fremdzone zu jener im umgebenden Bodenmaterial). Die einzelnen Parameter stehen in nicht geradlinigem, sondern ungefähr in einem exponentiellen Verhältnis zum Eintrittswiderstand. Sie beeinflussen sich auch gegenseitig untereinander. Somit ist es möglich, Parameterkombinationen auszuwählen, welche einerseits den praktischen Anforderungen (Festigkeit) gerecht werden und dennoch dem Idealfall eines möglichst druckverlustlosen Strömens im Drainbereich verhältnismässig nahekommen. Neben der Verringerung der Eintrittswiderstände sind auch noch Kriterien der Einschlämmungsgefahr zu berücksichtigen. Folgende Punkte sind bedeutsam:

— Allgemein hemmen *Verdichtungen* weit stärker die Zuströmung als Filter diese zu steigern vermögen. Verdichtungen am Rohre tendieren gegen den Zustand völliger Undurchlässigkeit, während Filter bestenfalls den Zustand reibungsloser Strömung, jedoch ohne Ausschaltung des geometrischen Anteiles am Widerstand, erreichen können (Bild 7).

— Stärkere Filterdicke wirkt auf die Eintrittsleistung stets steigernd. Die Zunahme der Wirksamkeit nimmt aber mit steigendem Verhältnis von Filterdicke zu Rohrradius ab (Bilder 10, 18, 19, 20, 21). Bei höheren $\varkappa$-Werten (insbesondere bei dicken Filtern) verringert sich diese Abnahme (Bilder 19, 23).

— Die Filterdicke wird von Faktoren aus der Baupraxis (Kosten des Filtermaterials, des Grabenaushubes, der Bohrung) begrenzt. Grob kann man *dünne Filter* mit $d \leqslant 4\, R_0$ (Rohrummantelungen) und *dicke Filter* mit $d > 4\, R_0$ (verfüllte Filterstoffe) unterscheiden. Diese Unterscheidung ist theoretisch durch den Grenzradius (Abschnitt 4) gegeben. Auf Grund dieser begrenzten Filterdicke sowie der effektiven Eintrittsleistungen handelsüblicher Rohre (W_0 etwa zwischen 0,5 bis 2,0) bringen $\varkappa$-Werte von über 100 gegenüber den restlichen Bodenwiderständen keine wesentliche Steigerung der Eintrittsleistung mehr.

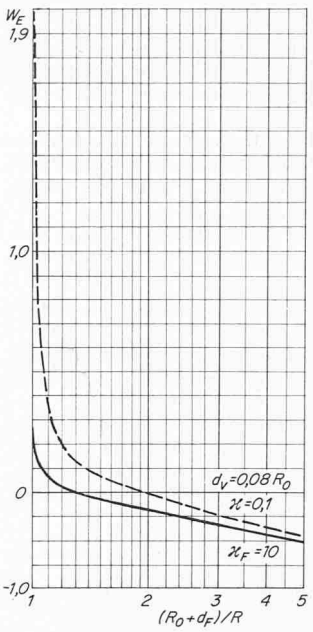


Bild 25. Eintrittswiderstände für dünne Filter mit (strichliert) und ohne Verdichtung, abhängig von der Filterdicke $d_F = 4$, $b = 0{,}032\ R_0$, $\varkappa_F = 10$, $\varkappa_V = 0{,}1$

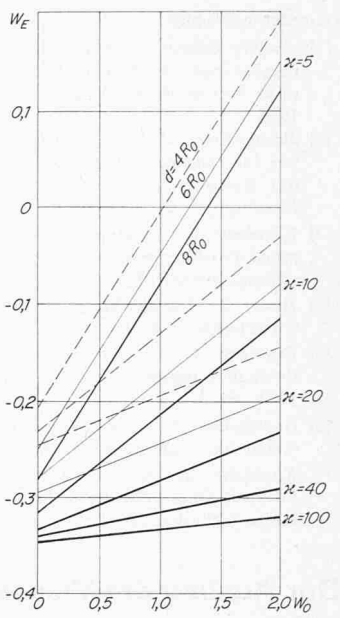


Bild 26. Eintrittswiderstände für dicke Filter ($d \geqq 4\ R_0$), abhängig vom Rohrwiderstand W_0
tung, abhängig von der Filterdicke

— Bei Rohren mit kleinem *Rohrwiderstand* (viele günstig verteilte Eintrittsöffnungen) und dünnen Filtern aber sind $\varkappa$-Werte über 40, möglicherweise schon 20, sinnlos (Bild 23, starke Linien). Rohre mit grossem Rohrwiderstand hingegen und dünnen Filtern verlangen die höheren $\varkappa$-Werte (Bild 23, dünne Linien).

— mit dicken Filtern wird der Einfluss des Rohrwiderstandes handelsüblicher Ware bei $\varkappa$-Werten von etwa 40 und darüber praktisch unbedeutend (Bild 26). In diesem Zusammenhang wäre eine Untersuchung von Durchlässigkeitswerten in verfüllten Drainagegräben aufschlussreich.

— überhöhte *Filterdurchlässigkeiten* sind vom hydraulischen Standpunkt wegen der zu erwartenden turbulenten Strömung im Rohrbereich ungünstig.

— besteht *Einschlämmgefahr*, so sind Rohre mit 6 oder mehr Schlitzreihen zu empfehlen, falls dünne Filter angewendet werden. Andernfalls ist für eine hydraulisch günstige Anströmung der Trennfläche zwischen Boden und Filter ein breiter Filter ratsam. Die Wahl des $\varkappa$-Wertes richtet sich dann nach Gesichtspunkten, welche hier nicht diskutiert wurden [1]. Hohe $\varkappa$-Werte tragen nur unwesentlich zu einer gleichmässigeren Anströmung der Trennfläche bei.

— *Anlagerungen an Filter* wirken sich um so weniger auf den Eintrittswiderstand aus, je dicker der Filter gewählt wird. Bei Annahme, dass nur dünne Verdichtungszonen ($d_V \leqslant 0{,}08\ R_0$) sich um den Filter legen und die Verdichtung den Wert $\varkappa_V = 0{,}1$ nicht wesentlich übersteigt, so ist der Einfluss von Filteranlagerungen bei dicken Filtern ($d_F \geqslant 4\ R$) bereits vernachlässigbar klein (Bilder 24, 25).

— Die Grenze, bei der eine *hydraulische Leistungssteigerung* durch Filter praktisch noch sinnvoll ist, bestimmt der zusätzlich erstrebenswerte Nutzeffekt, welcher bei Brunnen- und Drainanlagen, aber auch für diese wieder von Fall zu Fall verschieden sein wird. Sie wird auch vom hydraulischen Gesamtsystem einer Anlage mitbestimmt. Allgemein sind Filter eines bestimmten $\varkappa$-Wertes um so wirkungsvoller, je kleiner der geometrische Anteil des Bodenwiderstandes ist. Liegt der Anteil des Bodenwiderstandes in der Grössenordnung des Rohrwiderstandes, was praktisch vorkommt, so bringt eine Reduktion des Eintrittswiderstandes durch Filter auf die Hälfte des Rohrwiderstandes zum Beispiel eine Leistungssteigerung von 25%.

— Filter sind, wenn fachgemäss verlegt, in der Lage, den Rohrwiderstand von perforierten Rohren zu kompensieren und möglicherweise die Eintrittsleistung auch darüber hinaus noch so zu steigern, dass diese jener eines volldurchlässigen Rohres grösseren Durchmessers gleichkommt.

Literaturverzeichnis:

[1] *van der Beken, A.:* Etude des propriétés du voile de verre employé comme matériau d'enrobage des tuyaux de drainage. Communications de la Station de génie rural de l'Etat, Merelbeke/Gent, Publ. Nr. 16, 1966.

[2] *Breitenöder, M.:* Die Zuströmung zu Dränrohren in Mineralböden bei vollständiger Füllung der Bodenporen mit Wasser. Schriftenreihe des Kuratoriums für Kulturbauwesen, Verlag Wasser und Boden, Hamburg, 1960, H. 8.

[3] *Cavelaars, C.:* Hydrological aspects of the application of plastic drain pipes and filter materials. Research Dept., Kon. Nederl. Heidemaatschapij, privat, 1965.

[4] *Donat, J.:* Die Wirkung der Dränungen. «Wasserkraft und Wasserwirtschaft», 1936, H. 31, S. 73–77, 90–94.

[5] *Engelund, F.:* On the laminar and turbulent flows of groundwater through homogenous sands. «Trans. Dan. Akad. of Techn. Sci.», 1953, Nr. 3.

[6] *Gustafsson, Y.:* Die Strömungsverhältnisse in gedränten Böden. «Acta Agr. Suecana» II, 1946, H. 1.

[7] *Knobloch, H.:* Welche Rolle spielen die Kunststoffe in der Meliorationstechnik? «Schweiz. Zft. f. Vermessung, Photogrammetrie und Kulturtechnik», 1967, H. 8, S. 265.

[8] *Neuhaus, H. und Kuntze, H.:* Untersuchungen über Eigenschaften neuartiger Drainfilterstoffe. «Wasser und Boden», 1963, H. 15, S. 362–367.

[9] *Schlünsen, D.:* Untersuchungen mechanischer Eigenschaften von Kunststoffdränrohren als Grundlage zur Entwicklung einer Prüfmethode. Dissertation, Göttingen, 1965.

[10] *Stiefel, E.:* Einführung in die numerische Mathematik. Stuttgart, 1965, Teubner Verlagsges.

[11] *Terzaghi, K. und Peck, R. B.:* Die Bodenmechanik in der Baupraxis. Berlin 1961, Springer Verlag.

[12] *Wentworth, C. K.:* Laminar flow in the Honolulu aquifer. «Trans. Amer. Geophys. Union», *27*, 1946, S. 540–548.

[13] *Wesseling, J. and Homa, F.:* Entrance resistance of plastic drain tubes. Inst. voor Cult. en Waterhuisholding. Wageningen, privat, 1964.

[14] *Widmoser, P.:* Potentialströmung zu geschlitzten Rohren. «Schweiz. Bauzeitung *84*, 1966. H. 52, S. 913–919.

[15] *Widmoser, P.:* Der Eintrittsbereich an Drainagerohren. «Schweiz. Zft. f. Vermessung, Photogrammetrie und Kulturtechnik», 1967, H. 2, S. 54–78.

Der Ausbau der Wasserversorgung Kaliforniens

DK 628.1:626.8

Von **O. Hartmann**, Ing., Baden

In Kalifornien ist ein umfangreiches Projekt in Ausführung, um die Wasserversorgung des Landes für die kommenden Jahrzehnte sicherzustellen: Der *California State Water Plan*. Das Projekt umfasst die Erstellung von 17 Stauanlagen, 25 Pumpen- und Turbinenzentralen und über 1000 km Leitungsanlagen. Jährlich sollen 5200 Mio m^3 Wasser nutzbar gemacht werden. Die Gesamtkosten werden auf 2,6 Milliarden Dollar geschätzt. Planung und Bauausführung liegen beim staatlichen Department of Water Resources.

Kalifornien ist ein semi-arides Land. Nur im Nordwesten und in den Gebirgslagen der Sierra Nevada fallen grössere Regenmengen bis etwa 3000 mm. Das südliche Central Valley weist jährlich etwa 150 mm Niederschlag auf, die Colorado-Wüste im Südosten 50 mm. Gerade der trockene Süden hat aber den grössten Bevölkerungszuwachs. Hier liegen auch die grössten Agrargebiete.

Seit den Tagen des Goldrausches erlebt Kalifornien einen beinahe ununterbrochenen Aufschwung auf allen Gebieten. Das Einkommen pro Kopf liegt mit \$ 2871 (1962) mehr als 20% über dem USA-Durchschnitt. Mit knapp 20 Mio Einwohnern ist Kalifornien heute der volkreichste Staat der USA. Der Bevölkerungszustrom von aussen betrug während der vergangenen 10 Jahre durchschnittlich 1000 Personen pro Tag, die Bevölkerungszunahme insgesamt 575000 pro Jahr. Man nimmt an, dass sich diese Entwicklung ununterbrochen fortsetzen wird. Die Bevölkerung ist zu einem grossen Teil in zwei Ballungsräumen konzentriert: im Norden das Gebiet um die San-Francisco-Bucht mit der Hauptstadt Sacramento (rd. 6 Mio Einwohner), im Süden das Dreieck Los Angeles–San Bernardino–San Diego (etwa 10 Mio Einwohner). Rund die Hälfte der Bevölkerung lebt also im wasserarmen südlichen Drittel des Landes.

Der Wasserverbrauch der Städte, einschliesslich Industrie, beträgt im Durchschnitt 690 Liter pro Kopf und Tag. Vorliegende Schätzungen lassen einen nur geringen Anstieg erwarten; für einzelne Gebiete wird sogar mit einem Rückgang infolge steigender Wasserpreise gerechnet.

Die landwirtschaftliche Produktion, einst der wichtigste Wirtschaftszweig des Staates, wurde längst von Industrie und Dienstleistungsunternehmen überholt. Mit etwa 15 Milliarden Franken Jahreseinnahmen aus der Landwirtschaft (Schweiz 1963: 3,3 Milliarden Franken) liegt Kalifornien aber nach wie vor weit vor allen anderen Staaten der USA. Klima und Bodenbeschaffenheit ermöglichen höchs.e Ernteerträge; Voraussetzung ist aber künstliche Bewässerung. Etwa 95% der gesamten landwirtschaftlichen Produktion stammen von 3,25 Mio ha künstlich bewässerten Anbauflächen (landwirtschaftlich genützte Fläche der Schweiz 1,1 Mio ha). Der Wasserbedarf hängt natürlich von der örtlichen Niederschlagsmenge, der Bodenbe-

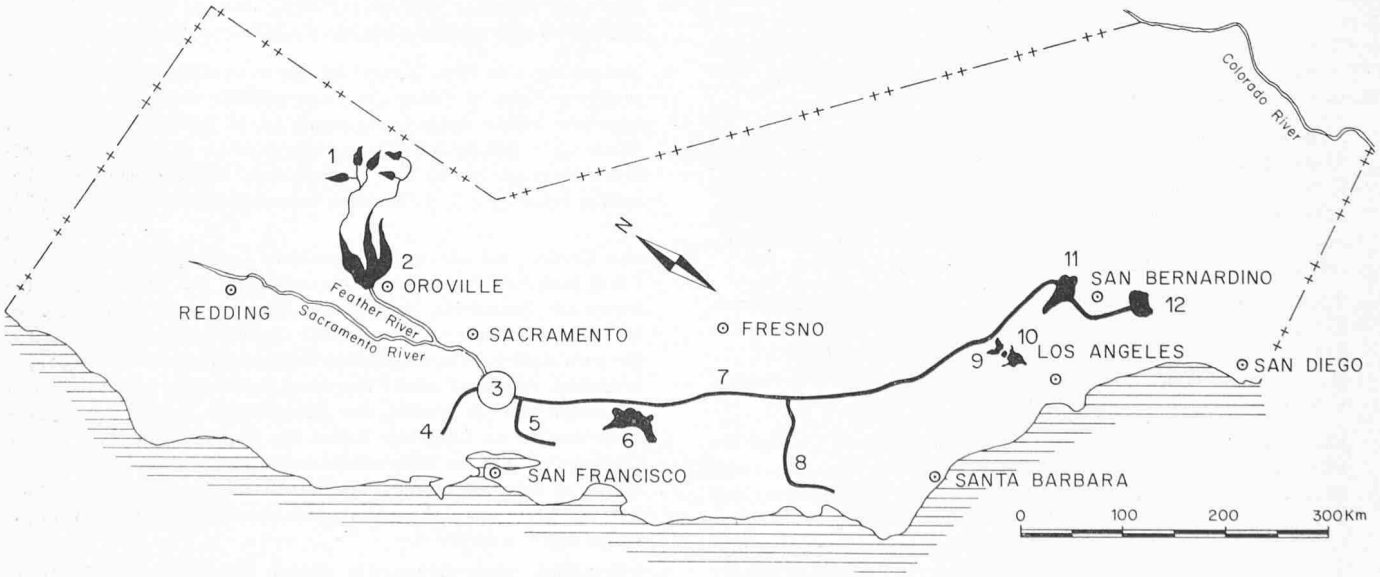


Bild 1. Lageplan des Bewässerungsprojektes für Kalifornien und dessen wichtigsten Anlagen

1 Oberer Feather River
2 Oroville-Speicher
3 Delta
4 North Bay-Aquädukt
5 South Bay-Aquädukt
6 San Luis-Speicher
7 Hauptkanal («California Aquaeduct»)
8 Küsten-Abzweig
9 Pyramid-Speicher
10 Castaic-Speicher
11 Cedar Springs-Speicher
12 Perris-Speicher