Zeitschrift: Schweizerische Bauzeitung

Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine

Band: 68 (1950)

Heft: 47

Artikel: Die wissenschaftlichen, technischen und wasserwirtschaftlichen Grundlagen für den Bau von Horizontalbrunnen

Autor: Abweser, Carl

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-58118

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: 17.07.2025

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

Nachdruck von Bild oder Text nur mit Zustimmung der Redaktion und nur mit genauer Quellenangabe gestattet

Die wissenschaftlichen, technischen und wasserwirtschaftlichen Grundlagen für den Bau von Horizontalbrunnen

DK 628.112.2

Von Dipl. Ing. Dr. techn. habil. CARL ABWESER, Goisern, Oberösterreich

Die seit etwa drei Jahren in der europäischen Fachpresse erschienenen Mitteilungen betreffend horizontale Bohrungen zum Zwecke der Erschliessung des Grundwassers veranlassten den Verfasser zum eingehenden Studium aller bis heute bekannten Systeme dieser Art und der im Zusammenhang damit stehenden Fragen. Schon bei flüchtiger Betrachtung der für Europa neuartigen Erschliessungsmethode scheint der Weg gegeben, die von Jahr zu Jahr immer schwieriger werdende Deckung des ungeheuer ansteigenden Wasserverbrauches in hervorragender Weise zu ermöglichen. Meine seit langem betriebenen Studien galten ausser den rein bautechnischen Fragen in erster Linie den hydrologischen, geologischen, hydraulischen und bodenphysikalischen Problemen, sowie den jeweiligen Gedankengängen, die zur Wahl dieser Bauart führten. Dass darüber hinaus auch wirtschaftliche Erwägungen zur Beurteilung massgeblich waren, soll die Vollständigkeit der Untersuchungen bekunden.

Der Verfasser hat sich die Aufgabe gestellt, das Thema der Horizontalbrunnen aus der bisherigen, mehr oder minder interessengebundenen Schreibweise herauszulösen und es — streng sachlich — in einer wissenschaftlichen und technisch-wirtschaftlichen Beurteilung zu behandeln. Um dieser Aufgabe gerecht zu werden, hat er im vergangenen Jahre fast sämtliche in Europa im Bau befindlichen oder fertiggestellten Horizontalbrunnen-Anlagen besichtigt, sowie sämtliche erreichbaren Unterlagen und Bauerfahrungen gesammelt und auch eine Reihe von Beobachtungsdaten und Versuchsergebnissen ausgewertet.

Bei nahezu allen Anlagen, sowie auch in fast allen Fällen, wo die Errichtung von Horizontalbrunnen im Planungsstadium vorlag, konnte festgestellt werden, dass man gerade den bei Horizontalbrunnen so entscheidend wichtigen Vorarbeiten nicht die gebührende Beachtung schenkte. Kein einziger der bisher fertiggestellten, im Bau befindlichen oder in Planung stehenden Brunnen wurde wirklich berechnet, das heisst, in keinem Falle wurden von Natur aus gegebene Daten einer Bemessung des Objektes zugrunde gelegt. Die bisher gepflogene Methode, die Grösse der Anlage, vor allem die Länge der Vortriebrohre auf Grund der verlangten Bedarfsmenge zu schätzen, muss bautechnisch, wirtschaftlich und nicht zuletzt wissenschaftlich abgelehnt werden. Diese auf Grund mangelnder Berechnungsmöglichkeit entwickelte Gepflogenheit führt dazu, dass die errichteten Anlagen entweder überdimensioniert oder zu knapp bemessen werden; sie stört auch die wirtschaftliche Beurteilung, nimmt dem Bauherrn die Kontrollmöglichkeit hinsichtlich des Bauumfanges und gibt auch sonst noch durch die geschaffene Unklarheit Anlass zur Kritik. Es kann daher durch Präzisierung der Berechnungsgrundlagen und Klarstellung eines allgemein gültigen Berechnungsverfahrens der weiteren Entwicklung des Horizontalbohrverfahrens nur gedient werden.

Allein schon eine Beurteilung der Wirtschaftlichkeit eines Horizontalbrunnens in Gegenüberstellung zu Vertikalbrunnenanlagen kann nur dann einen Sinn haben, wenn man die Gewissheit erlangt hat, dass das erstellte Objekt tatsächlich bemessen wurde, d. h., dass man auf Grund der gegebenen hydrologischen, geomorphologischen, bodenphysikalischen und hydraulischen Verhältnisse die richtigen Abmessungen gewählt und damit die sparsamste Lösung gefunden hat. Die Ergebnisse der rechnerischen Auswertung kommen in folgendem zum Ausdruck:

1. Wahl des zu erschliessenden Grundwasserhorizontes;
2. Festlegung von Bauart und Grösse des Schachtes;
3. Hydraulische Berechnung, bzw. Bestimmung der Anzahl, Lage, Einzel- und Gesamtlänge der Filterrohre;
4. Art und Umfang der Entsandung, sowie Grösse, Form und Anordnung der Schlitze im Filterrohr.

1. Wahl des zu erschliessenden Grundwasserhorizontes

Der Aufgabenbereich, der sich hier der vorbereitenden Planung eröffnet, fällt in das Gebiet der Hydrologie, der Hydrogeologie und der Bodenphysik, und er berührt auch die Einzugsgebiets-, Wasserhaushalt- und Schutzbereichfrage. Da all das auch bei gewöhnlichen Brunnenanlagen vorliegt, sollen die bezüglichen Methoden hier nicht näher erörtert werden. Es sei lediglich festgestellt, dass infolge der in der Regel weit grösseren Beanspruchung von Grundwasserrevieren durch Horizontalbrunnen diesen Vorarbeiten grösstes Augenmerk zu schenken ist. Die erst im Anschluss daran vorzunehmenden Bodensondierungen mit allen zugehörigen Arbeiten wie Siebanalysen, Porenraumbestimmungen, Strukturuntersuchungen usw. sind von entscheidender Bedeutung nicht nur für die Detailberechnung des Brunnens, sondern auch für die technische Baudurchführung und letzten Endes für die Verlässlichkeit des Kostenanschlages. Es kann nicht oft und eindringlich genug vor einer Bagatellisierung dieser Arbeiten gewarnt werden.

Das Endziel der unter Punkt 1 genannten Arbeiten ist demnach der Nachweis der dauernden Ergiebigkeit des gewählten Grundwasserträgers, sowie die genaue Beschreibung des Aufbaues des durchströmten Untergrundes einschliesslich der bodenphysikalischen Charakterisierung seiner Struktur in entsprechender Umgebung der Entnahmestelle.

2. Festlegung von Bauart und Grösse des Schachtes

Da, wie unter Punkt 3 ausgeführt wird, der Schacht lediglich notwendiger Bauwerkteil der Gesamtanlage ist, sind die Voraussetzungen für seine Konstruktion rein bautechnischer Natur. Als Bauart kommt sowohl die Ausführung als offener Senkschacht, wie auch die pneumatische Gründung in Betracht. Die Entscheidung über diese Frage liegt weniger in der Art und Struktur der durchfahrenen Schichten begründet, als in rein wirtschaftlichen Erwägungen. Der vielfach angeführte Vorteil der Caisson-Gründung, die Möglichkeit der Entnahme von ungestörten Bodenproben an der Sohle, ist nicht stichhaltig, da dieses Ziel viel billiger durch Bohrsonden erreicht wird. Trotzdem aber gibt es Fälle, wo die Pressluftgründung die einzige Möglichkeit bietet.

Was den Durchmesser des Schachtes betrifft, so ist er in erster Linie, der vorgesehenen Tiefe entsprechend, so zu wählen, dass das für die Absenkung notwendige Gewicht vorhanden ist. Soweit heute beurteilt werden kann, scheint mit Rücksicht auf den verfügbaren Arbeitsraum ein Mass von 4 m zweckmässig, jedoch können bei kleineren Schachttiefen auch geringere Durchmesser, etwa 3 bis 3,5 m, Anwendung finden. In jedem einzelnen Fall entscheiden die vorliegenden Aufschlüsse. Die grössten Tiefen liegen bei 40 bis 50 m, die grösste Wirtschaftlichkeit jedoch in mittlerer und geringer Tiefe.

3. Hydraulische Berechnung, bzw. Bestimmung der Anzahl, Lage, Einzel- und Gesamtlänge der Filterrohre

Die hydraulische Berechnung eines Horizontalbrunnens und die auf Grund der verlangten Leistung vorzunehmende Bemessung der einzelnen Bauwerkteile kann, wie die Erfahrung gezeigt hat, nicht nach der üblichen Brunnengleichung geschehen. Das hydraulische Problem der Grundwassereinströmung in horizontale, geschlitzte Rohre muss in einer Form gelöst werden, die den bei Horizontalbrunnen veränderten Entnahmeverhältnissen Rechnung trägt.

Bei allen folgenden Ableitungen gelten die Bezeichnungen:

Q = Gesamtentnahmemenge in m^3/s
q = Entnahmemenge des Filterrohr-Elementes in m^3/s
$\overline{q}$ = Entnahmemenge pro 1 m Filterrohr in m^3/s
k = Durchlässigkeitszahl in m/s
H = Höhe des ungesenkten Grundwasserspiegels über der undurchlässigen Sohle in m
z, z_0 = Höhe des abgesenkten Wasserspiegels über der undurchlässigen Sohle in m (Vertikalbrunnen)
h, h_0 = Höhe des abgesenkten Wasserspiegels über der undurchlässigen Sohle in m (Horizontalbrunnen)
S = Absenkung des Grundwasserspiegels in m
R = Hydraulische Reichweite in m
r = Filterrohr-Radius in m
L = Länge der Horizontalfilterrohre in m

Die klassische *Dupuit-Thiemsche* Spiegelgleichung, die für normale, bis zur undurchlässigen Schicht abgeteufte Vertikalbrunnen bei vorwiegend waagrechter Strömung aufgestellt wurde und die

$$z = \sqrt{H^2 - \frac{Q}{\pi k} \ln \frac{R}{r}}$$

lautet, kann nicht einmal für einfache Schachtbrunnen bei starker Absenkung gültig sein, da mit wachsender Depression das Randwertproblem undiskutable Werte liefert. So müsste z. B. die grösste Wassermenge bei einem Durchflussquerschnitt Null erreicht werden, was sinnwidrig ist. Während also nach Dupuit bei kleinstem z-Wert theoretisch die grösste Entnahmemenge auftreten müsste, weist *Sichardt* durch den Begriff des Brunnenfassungsvermögens nach, dass diese Höchstentnahmemenge nur bei grossem z-Wert möglich ist. Aber auch Sichardts Entwicklung gilt nur in bestimmten Grenzen.

Gegen die Ableitung der *Sichardtschen* Formulierung

$$q_{max} = 2\pi \frac{\sqrt{k}}{15} r z$$

besteht kein Einwand. Sie besagt, dass ein Grösstwert der Entnahme bei grossem r, grossgehaltenem z, also kleiner Absenkung und selbstverständlich hohem k-Wert zu erwarten ist. Schreibt man die Gleichung in der Form

$$q_{max} = C r z,$$

dann erkennt man, dass sie zwar unendlich viele reelle Lösungen ergibt, also Ausführungsformen (r) und Betriebsformen (z), dass hydraulisch hingegen einem gewählten r niemals ein beliebiges z zugeordnet werden kann. Die Beurteilung des Sichardtschen Gedankenganges wird erst klar, wenn man seine Ableitung in der Form

$$q_{max} = F \frac{\sqrt{k}}{15}$$

betrachtet, wobei F die angeströmte Zylinderfläche bedeutet. Sichardt hat seiner Entwicklung ein zulässiges Höchstgefälle am Brunnenmantel zu Grunde gelegt. Mit dieser Eingrenzung erst, die in engem Zusammenhang mit dem Wassersprung am Brunnenmantel steht, wird die Formulierung eindeutig.

In Bild 1 sind die Ergebnisse der Dupuit-Thiemschen Theorie und ihre praktischen Brauchbarkeitsgrenzen nach Sichardt dargestellt. Die Diagramme zeigen, dass der Sichardtsche Versuch in erster Linie den mangelhaften Randbedingungen am Brunnenrand Rechnung trägt, in keiner Weise aber den übrigen willkürlichen Annahmen Dupuits auf den Grund geht, wie z. B. der Reichweite, dem geringen Spiegelgefälle, der unendlich tiefen, waagrechten Lage der undurchlässigen Sohle und der Geschwindigkeitsverteilung in der Lotrechten.

Die gegenüber Vertikalfassungen völlig anders geartete Erschliessung des Grundwassers bei Horizontalbrunnen veranlasst zunächst zur Frage, ob die hydrodynamischen Verhältnisse bei dieser Grundwassergewinnungsart der Dupuitschen Theorie oder der Sichardtschen Eingrenzung mehr oder weniger entsprechen, als dies bei Vertikalbrunnen der Fall ist.

Man darf hier zunächst den fundamentalen Unterschied beider Systeme nicht übersehen, nämlich die Tatsache, dass der Schacht beim Horizontalbrunnen überhaupt nicht mehr die Rolle eines Brunnens spielt. Er ist der unterirdische Sammler der einzelnen Horizontalfassungen, und die Wahl seiner Grösse ist ohne jeden Einfluss auf die Ergiebigkeit der Anlage, er ist nur mehr notwendiger Bauwerkteil ohne hydraulische Verpflichtungen. Von dieser Feststellung ausgehend, kommt man zu dem einfachen Schluss, dass ein Horizontalbrunnen lediglich aus einer Anzahl mehr oder weniger langer, horizontal im Grundwasserträger gelagerter Filterrohre besteht, aus deren einem Ende die Wasserentnahme erfolgt. Ein Horizontalbrunnen-Element sieht demnach schematisiert etwa so aus, wie es Bild 2, linke Hälfte, zeigt. Bei einer Anzahl solcher Elemente verwachsen die einzelnen lotrechten Entnahmerohre zum Schacht. Ein Versuch, die Zuströmung des Grundwassers zu einem kleinen Zylinder (Bild 2, rechte Hälfte) nach dem Dupuitschen Ansatz zu rechnen, müsste für die in diesem Sonderfall geltende Beziehung

$$\overline{q}_D = \left(\frac{d \pi k}{\ln \frac{R}{r}}\right)\left(\frac{H^2 - z_0^2}{z_0}\right),$$

worin der Index D auf Dupuit hinweist, ganz undiskutable Werte ergeben, denn man erkennt, dass bei Konstanz des ersten Klammerausdruckes die Entnahmemenge auch bei konstanter Absenktiefe nur durch H beeinflusst wird.

Auf Grund einfacher Analogieschlüsse ist es nun unter anderem möglich, die Anströmung von horizontalen, im Grundwasser verlegten Filterrohren nicht mehr im Näherungsverfahren für waagrechte Strömungen unter freier Oberfläche zu beschreiben, sondern als Strömungsvorgang zu betrachten, dessen Bereich allseits von festen Stromflächen und Querschnitten begrenzt ist. Die für diese Auffassung notwendigen Festlegungen an den Grenzschichten bedeuten keine Annäherung im Sinne einer Annahme, wie sie der Dupuitschen Lösung zu Grunde liegt, sondern eine Vorsichtsmassnahme.

Die Aufgabe ist zunächst als zweidimensionales Problem lösbar und liefert sowohl für den Darcyschen Geltungsbereich als auch für die übrigen Widerstandsgesetze befriedigende Ergebnisse. Raumgleichung und Widerstandsgesetz liefern den bekannten Zusammenhang

$$\frac{q}{2 r \pi d} = f\left(\frac{d h}{d r}\right),$$

wobei im Darcy-Bereich

$$k \frac{d h}{d r}$$

zu setzen ist. Nach Integration und Einführung der Randbedingungen erhält man

$$q = \frac{(H - h_0)\, 2 \pi k d}{\ln \frac{R}{r}}.$$

In dieser Darstellung erscheint die Grösse H nur in Verbindung mit h_0 in Form der Absenkung $S = H - h_0$. Es ist demnach für die Grösse der Ergiebigkeit die Mächtigkeit des Grundwasserträgers belanglos, analog wie bei artesischem Wasser. Da der Wert für

$$\ln \frac{R}{r}$$

für alle praktisch vorkommenden Reichweiten, sowie für verwendbare Filterrohrdurchmesser von 20 bis 25 cm nur zwischen den Grenzen 6,00 und 6,60 schwankt, im Mittel demnach bei 6,30 liegt, und da es ferner gleichgültig ist, ob das Filterrohr-Element waagrecht oder lotrecht liegt, ergibt sich die überaus einfache Beziehung $q = S k d$, die besagt, dass die Ergiebigkeit direkt proportional der Absenkung, dem Rohrdurchmesser und dem Bodenbeiwert ist. Für ein horizontales Filterrohr von 1 m Länge bei 20 cm Durchmesser vereinfacht sich die Beziehung in $\overline{q} = S k\, 0{,}2 \cdot 5{,}0 = S k$. Schliesslich besagt eine letztmögliche Vereinfachung der Beziehung in $\overline{q}_s = k$, dass die Entnahmemenge pro Meter Filterrohr und pro Meter Absenkung gleich dem Bodenbeiwert ist. Die Leistung eines horizontalen Filterrohres von L m Länge bei S m Absenkung beträgt demnach $Q = L S k$.

Es sei hier ausdrücklich erwähnt, dass diese Lösungsart sich auf die Analogie des Strö-

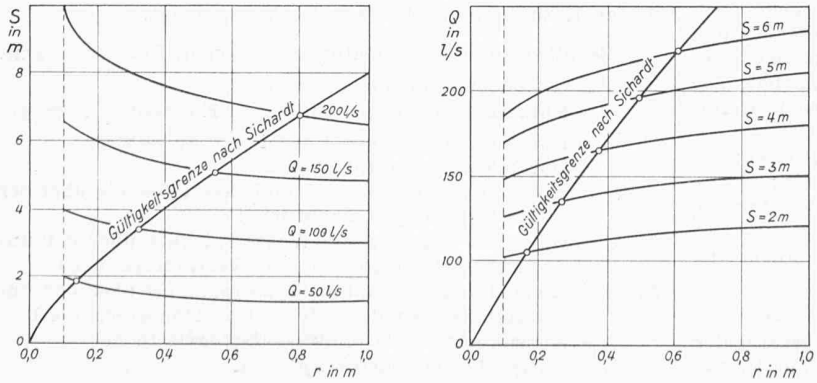

Bild 1. Die Sichardt'schen Brauchbarkeitsgrenzen der Dupuit-Thiem'schen Brunnentheorie

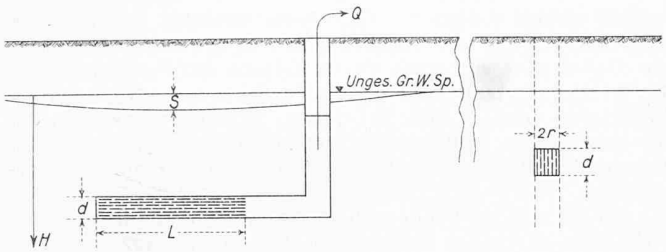

Bild 2. Horizontalbrunnen-Element

mungsbildes bei zweidimensionaler, geradliniger Filterbewegung stützt und dass aus dieser Kennzeichnung hervorgeht, dass bei räumlicher Behandlung, aber auch unter Berücksichtigung krummliniger Filterbewegung (Potentialströmung), höhere Werte zu erwarten sind.

Eine Berechnung der Aufgabe als zweidimensionaler, geradliniger Strömungsvorgang zu einem röhrenförmigen Schlitz ergibt ebenfalls für 1 Meter Schlitzlänge die Beziehung $\overline{q} = S\,k$.

Die räumliche Lösung (Index R), deren Ansatz hier

$$\frac{q_R}{2\pi r^2} = k\,\frac{dh}{dr}$$

lautet, ergibt nach Integration

$$h = H - \frac{q_R}{2\pi k r}$$

und daraus $q_R = S\,k\,2r_0\,\pi$. Da $2r_0 = d$ ist, erhält man die Beziehung $q_R = S\,k\,d\,\pi$ oder $q_R = q\,\pi$. Ueberlegt man, dass der Wert q_R auf die einmetrige Einheit bezogen nicht den fünffachen Wert, entsprechend

$$\frac{\overline{q}}{q} = \frac{S\,k}{S\,k\,d} = 5$$

erreicht, sondern nach einigen Umformungen

$$\overline{q}_R = (0{,}4 + d\,\pi)\,S\,k = 1{,}028\,S\,k$$

wird, dann erkennt man sofort die grosse Uebereinstimmung, die gleichzeitig die vorausgesagte, günstigere Ergiebigkeit zum Ausdruck bringt.

Schliesslich sei zum Vergleich die Behandlung der Aufgabe als Potentialproblem (Index P) kurz gestreift. Im wesentlichen handelt es sich dabei um eine Näherungslösung, die zwar im Prinzip dem Senkfadenproblem ähnelt (Kozenys Quellsenkenversuch), hingegen aber ganz andere Randbedingungen aufweist. Kann die Einströmfläche nicht geradlinig angeströmt werden, dann lautet die Potentialfunktion in unserem besonderen Fall

$$\Phi = \frac{E}{2\pi}\,ln\,r\,.$$

Der entsprechende Ansatz ergibt nach Integration und Einführung der Randbedingungen

$$k\,(H - h) = \frac{q_P}{4\pi r_0}\,ln\left(\frac{2r_0}{a} + \sqrt{1 + \left(\frac{2r_0}{a}\right)^2}\right)$$

für die sogenannte Quellstrecke $2r_0$. Nach weiteren Umformungen erhält man dann die angenäherte Beziehung $q_P \cong 0{,}85\,S\,k$ und für das einmetrige Brunnenelement $\overline{q}_P \cong 1{,}25\,S\,k$.

Fasst man sämtliche Ergebnisse zusammen, dann lassen sie sich durchwegs in der Form $\overline{q} = \alpha\,S\,k$ anschreiben, worin $\overline{q}$ die Ergiebigkeit pro 1 Meter Horizontalrohr bei 20 cm Durchmesser bedeutet, S die Absenktiefe und k die Bodenkonstante ausdrückt. α ist der Koeffizient, der je nach den gegebenen Verhältnissen der Rohrlage im Grundwasserträger zwischen 1,00 und 1,25 schwanken kann. Er charakterisiert gewissermassen die jeweils gegebene Problemlage und möge als Anströmungskoeffizient bezeichnet werden.

Eine Diskussion der vorläufigen Endformel $Q = \alpha\,L\,S\,k$ besagt, dass die Entnahmemenge uneingeschränkt proportional der Absenktiefe ist. Zum Unterschiede von Vertikalbrunnen, die bei zunehmender Absenkung an Eintrittsfläche verlieren und daher bei steigender Entnahme erheblich grössere Anströmgeschwindigkeiten aufweisen, bleibt beim Horizontalbrunnen die Anströmfläche bis zur Tiefe des obersten horizontalen Fassungsrohres konstant. Daraus folgt zwingend, dass die Vergrösserung der Anströmgeschwindigkeit bei konstantem F lediglich einer Vergrösserung des Standrohrspiegelgefälles entspricht. Bei Gültigkeit der Beziehung

$$v = k\,\frac{S}{l}\,,\ \text{bzw.}\ Q = F\,k\,\frac{S}{l}$$

und Konstanz der Werte F, k und l ist die Entnahmemenge $Q = f\,(S)$. Bei Aenderung von S wird weder k noch l verändert, demnach wird S direkt proportional v und bei konstantem F auch direkt proportional der Entnahmemenge.

So selbstverständlich einleuchtend diese Zusammenhänge sind, bedürfen sie doch einer strengen Diskussion, denn das Widerstandsgesetz wird, dem Einfluss der Trägheitskräfte sowie den Eingrenzungen durch präzise zu formulierende Randbedingungen entsprechend, in verschiedener Darstellung zum Ausdruck gebracht. Inwieweit nun diese Grenzbereiche für unsere Fälle Gültigkeit haben, ist vorerst belanglos, entscheidend bleibt, dass die Proportionalität zwischen Q und S bei Horizontalentnahmen unter allen Umständen in einem grösseren Bereich gilt, als dies bei Vertikalbrunnen der Fall ist.

Dies ist die wichtigste Schlussfolgerung aus der bisherigen Entwicklung, denn sie leitet zwangsläufig zu jenen Problemen über, welche die weitere Vergrösserung dieses Bereiches berühren, nämlich die Diskussion der bodenphysikalischen und hydraulischen Funktion des Bodenkörpers, der die horizontalen Filterrohre umgibt.

4. Art und Umfang der Entsandung sowie Grösse, Form und Anordnung der Schlitze im Filterrohr

Durch den Entsandungsvorgang werden um das Rohr künstlich Verhältnisse geschaffen, die sowohl den Zuströmungsprozess massgeblich beeinflussen und ausserdem der Gefahr einer Versandung des Filters im Betrieb vorbeugen. Die Situation im Bereiche der durch die Entsandung entstehenden Filtergalerie möge durch folgendes idealisierte Beispiel (Bild 3) charakterisiert werden. Um das Entnahmerohr E lagert homogenes Korngemisch von bestimmter Struktur und den Korngrenzen d_0 bis d_n. In konzentrischen Zylinderkörpern, den Zonen I bis IV, herrschen die Filtergeschwindigkeiten v_1 bis v_4 am jeweiligen Zonenrand und die wahren Grundwassergeschwindigkeiten v_{w1} bis v_{w4}, die sich der Homogenität des nicht entsandeten Bodens entsprechend wie

$$v_1 : v_2 = r_{II} : r_I = v_{w1} : v_{w2}\ \text{usw.}$$

verhalten. Durch den Entsandungsprozess werden nun die in der rechten Bildhäfte schematisch dargestellten Gemischbereiche ausgebildet. Es lässt sich nun leicht beweisen, dass in diesem Falle bei gleicher Entnahmemenge zwar $v'_1 = v_1$, $v'_2 = v_2$ usw. und $v'_{w1} = v_{w1}$ wird, aber $v'_{w2} < v_{w2}$, $v'_{w3} < v_{w3}$ und $v'_{w4} < v_{w4}$ sein muss, da entsprechend der bekannten Beziehung $v = \varepsilon\,v_w$ die wahre Grundwassergeschwindigkeit unter sonst gleichbleibenden Verhältnissen bei Vergrösserung des Porenhohlraumes kleiner werden muss. Bleiben also bei

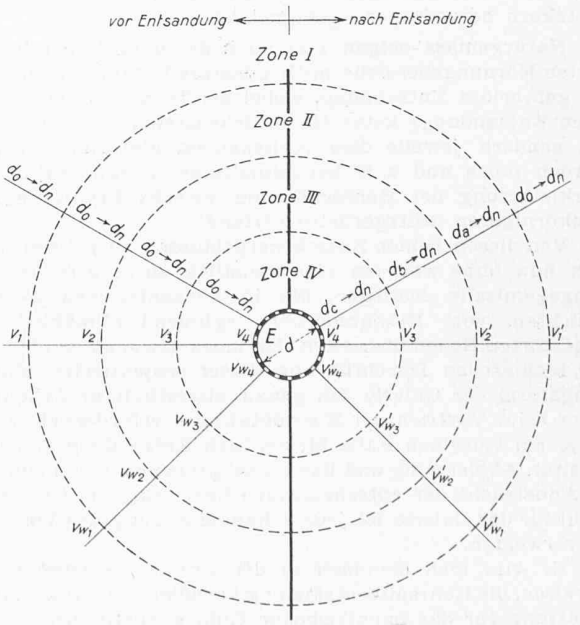

Bild 3. Idealisierte Darstellung der Filtergalerie

konstanter Entnahmemenge alle Werte v_n und v'_n ebenfalls konstant, dann muss sich bei Vergrösserung des Porenraumes selbstverständlich k ändern, also grösser werden und schliesslich J wegen der Gültigkeit der Beziehung $v = kJ$ kleiner werden. Damit ist aber bereits die hydraulische Funktion der entsandeten Filtergalerie gekennzeichnet, denn die obige Schlussfolgerung besagt, dass bei konstanter Entnahmemenge die Vergrösserung des Porenraumes eine Verringerung des relativen Druckhöhengefälles zur Folge hat und dass demnach die Entnahmemenge Q bei entsandeter Galerie schon bei geringerer Absenktiefe erreicht wird.

Diese Erkenntnis ist von grosser wirtschaftlicher Tragweite, weil in konsequenter Verfolgung dieser Tatsache die Möglichkeit gegeben ist, die künftige Förderhöhe und damit die dauernd belastenden Betriebskosten so niedrig wie möglich zu halten. Die Frage, die dem Hydrologen hier gestellt wird, lautet also: in welcher Weise hat bei dem durch Proben aufgeschlossenen Untergrund der Sandentzug zu erfolgen, damit der Optimalwert der Leistungsfähigkeit bei kleinster Absenkung des Grundwasserspiegels und grösster Stabilität der Galerie erreicht wird?

Aus den entnommenen Bodenproben werden zunächst Siebanalysen durchgeführt, sodann wird aus dem wirksamen Korndurchmesser ein orientierender k-Wert festzustellen sein. Schliesslich erfolgt die Ermittlung der Porenziffer für loseste und dichteste Lagerung. Da nun die wahre Grundwassergeschwindigkeit den Grad der Entsandung bestimmt, d. h. die Inbewegungsetzung und den Abtransport der einzelnen Körner, ist es erforderlich, die entsprechenden v_w-Werte bei verschiedenen Entnahmemengen und verschiedenem J in einzelnen konzentrischen Zylinderflächen zu berechnen. Da nun auch in dem vom Grundwasser durchströmten Boden eine ähnliche morphologische Wirkung des Grundwassers zu erwarten ist wie jene des Porenwassers in geschüttetem Material, so gelten auch hier zunächst die groben Grenzen der zu- und abnehmenden scheinbaren Kohäsion. Da bei ruhendem Porenwasser die Korngrösse von 15 mm diese Bereiche trennt und auch bei bewegtem Grundwasser diese Grenze nur dann bei gröberem Korn liegt, wenn dem Boden Gelegenheit zum Ausweichen geboten ist, kommt der Beachtung dieser Grenzbereiche bei der Vornahme der Entsandung grosse Bedeutung zu.

Während bei feinem Material die Grenzlinie der Wasserkapazität sehr nahe an den ε-Wert heranreicht, also im Bereiche der geschlossenen Grundwasserzone die Folgen der Breibildung nur durch Verhinderung des Ausweichens unterbleiben, wird bei gröberem Material selbst nach erfolgtem Abgang des feinen Füllmateriales eine entsprechende Stützschicht verbleiben. Weitere Studien haben das interessante Ergebnis erbracht, dass ein Boden vom Korndurchmesser zwischen 10 und 15 mm, einer Gleichgewichtsböschung tg $\varphi =$ 0,9 entsprechend, eine praktisch unveränderliche Stabilität, d. h. konstante scheinbare Kohäsion aufweist und damit als Stützkorn hervorragend geeignet ist.

Naturgemäss zeigen nun auch die unmittelbar benachbarten Körnungsbereiche noch günstige Voraussetzungen für die gefahrlose Entsandung, wobei der Terminus der «gefahrlosen Entsandung» keine einheitliche Grenzfestlegung bedeutet, sondern jeweils dem vorliegenden Material angepasst werden muss und z. B. bei feinkörniger Sedimentation eine Verkleinerung der Rohrschlitzung zwecks Erhaltung eines feinkörnigeren Stützgerüstes verlangt.

Von diesen beiden Zwischenergebnissen ausgehend lassen sich nun ohne weiteres jene künstlich zu schaffenden Körnungsgemische festlegen, die in konzentrischen Zylinderschichten, vom Entnahmerohr beginnend allmählich zum ungestörten Boden überleiten. Es muss erwähnt werden, dass zur technischen Durchführung dieser projektierten Entsandungsform der Galerie ein genau abgestimmter Arbeitsvorgang beim Vortrieb der Horizontalrohre erforderlich ist, der in jedem einzelnen Falle hinsichtlich Entsandungsdauer, Intensität, Abblendung und Bereichsabgrenzung festzulegen ist. In Anbetracht der entscheidenden Bedeutung der Grösse und Struktur der Galerie ist jede Schablonisierung des Vortriebes zu verwerfen.

Es wird sich demnach in der Praxis als zweckmässig erweisen, die Rohrspitzentsandung vornehmlich auf die Raumschaffung für das nachtreibende Rohr abzustimmen und damit eine Vorentsandung einzuleiten. Bei Stillstand des Vortriebes erfolgt sodann die Galerie-Entsandung. Das Rohr ist also etappenweise vorzutreiben. Der Entsandungsprozess wird zur Gänze aber erst nach Fertigstellung des Fassungsrohres bei leergepumptem Schacht durch jeweils festzulegende Spülungsweise beendet sein. Bei diesem letzten Spülprozess, der die erwünschte Stützschichtform vollenden soll, wird unter Umständen die Verwendung verschiebbarer Blenden erforderlich.

Es ist nun die Frage naheliegend, ob die Möglichkeit besteht, den durch die beschriebene Entsandung erzielten Vorteil ziffernmässig auszudrücken, bzw. in die im vorigen Abschnitt entwickelte Leistungsformel einzubauen. Bezeichnet E den Entsandungskoeffizienten, dann ist seine Grösse bei nicht entsandetem Boden 1. E wird daher stets grösser als 1 sein und $\overline{q} = \alpha E S k$ bzw. $Q = \alpha E L S k$ lauten.

Untersuchungen ergeben, dass der E-Wert sowohl vom wirksamen Korndurchmesser, vom $^0/_0$-Anteil des Hauptstützkornes, vom Porenraum des ursprünglichen Bodens und vom Durchmesser der Galerie abhängig ist. Die Beziehung lautet in allgemeiner Form

$$E = f\,(d_w,\ d_H,\ \varepsilon,\ R_g).$$

Soweit bisher festgestellt werden konnte, bewegen sich die E-Werte zwischen 1,05 und 2,6, woraus die grosse Bedeutung der Galerie ersichtlich wird. Einzelne Ueberprüfungen bestehender Anlagen haben gute Uebereinstimmung ergeben.

Erst die genaueste Kenntnis der durch Sandentzug entstehenden Strukturform im durchsickerten Medium, die nur aus der natürlichen ursprünglichen Sedimentationsform abgeleitet werden kann, sowie die Kenntnis der Verteilung der geometrischen Kornformen, der Lagerung der Körner zueinander und schliesslich ihrer Oberflächenrauhigkeit ermöglichen die eindeutige Beurteilung des Wertes der Entsandung. Der grosse Schwankungsbereich des E-Wertes zeigt die grosse Bedeutung dieser Vorarbeit. In der Beziehung

$$Q = \alpha E L S k$$

bedeuten in einem bestimmten Baufalle nur α und k Koeffizienten, die durch technische Eingriffe nicht veränderlich sind, hingegen kann E durch entsprechende Massnahmen beeinflusst werden. Es ist möglichst hoch zu halten, da E bei verlangtem Q allein imstande ist, die Werte L und S klein zu halten. Dabei kommen in der Grösse L (Rohrlänge) der Anlagewert und in der Grösse S (Absenkung) die Betriebskosten zum Ausdruck. Die obenstehende Gleichung gibt demnach in dieser synoptischen Darstellung ein instruktives Bild der technisch-wirtschaftlichen Bedeutung der einzelnen Faktoren.

Da es in allen Fällen erwünscht sein dürfte, die Betriebskosten möglichst klein zu halten, wird bei optimalem E-Wert ein möglichst grosses L erwünscht sein. Da aber die maximale Grösse von L letzten Endes nur vom Durchmesser des Filterrohres abhängt und, wie die Begrenzung der höchstzulässigen Fliessgeschwindigkeit im Rohr nahe dem Schachtrand zeigt, bei 20 cm Rohrdurchmesser kaum höhere Werte als etwa 60 m pro Strang erreichen kann, ergibt sich daraus die interessante Schlussfolgerung, dass es gar keinen Sinn hätte, ein recht grosses L zu wählen, wenn der aus möglichst gross gehaltenem E-Wert resultierende Wassernachschub gar nicht mehr abtransportiert werden könnte. Es hängt also der Entsandungskoeffizient mit der Einzelrohrlänge eng zusammen in der Weise, dass das Produkt beider ein Maximum werden muss. Da αk konstant ist und E ausserdem auch mit S indirekt zusammenhängt, hat die Beziehung

$$Q = C\,(E\,L)_{\max} \begin{cases} S_{\min} = Q_{\text{Dauerbelastung}} \\ S_{\max} = Q_{\text{Spitzenbelastung}} \end{cases}$$

nur dann volle Gültigkeit, wenn die Entnahmemenge uneingeschränkt proportional der absoluten Standrohrspiegeldifferenz ist. Damit ist aber nicht nur der Anwendungsbereich der ursprünglichen Formel $Q = L S k$ definiert, sondern auch zum Ausdruck gebracht, dass in der Beziehung $Q = C\,(E L S)$ die Werte E, L und S voneinander abhängige Variable sind. Filterrohrlängen über 60 m können keinen nennenswerten Mehrertrag liefern und Vortriebe über 80 m sind nutzlos, solange nicht grössere Filterrohrdurchmesser Verwendung finden. Aber selbst bei Verwendung grösserer Rohre wird die Vortriebsgrenze nicht wesentlich erhöht.

Die vorstehenden Ueberlegungen sind sinngemäss zu erweitern, wenn die Anordnung der Filterrohre in mehreren

Etagen notwendig wird, bzw. wenn die einzelnen Stranglängen verschieden sind. Insbesondere ist ein Uebergreifen der Filtergalerien zu vermeiden, ebenso die Führung des Filters in grössere Nähe als etwa 3 m vom Schachtrand.

Die festgestellte Grösse des *E*-Wertes steht nun auch in engstem Zusammenhang mit der Wahl der Grösse, Form und Anordnung der Schlitze im Rohr. Die Grösse der Schlitze wird bestimmt durch die Korngrösse der innersten Filtergalerie, die Form der Schlitze durch die geometrische Kornform der engsten und weiteren Galeriebereiche, schliesslich die Anordnung am Rohr durch die Verteilung von Korngrösse und geometrischer Kornform. Eine einheitliche Wahl von Filterrohrtypen muss sich demnach als unrichtig erweisen und entweder zu einer verminderten Ergiebigkeit gegenüber dem errechneten Wert oder zu einem gefährlichen Kornversturz mit nachfolgender Versandung des Brunnens führen.

Aus dieser Darstellung der Ermittlung des *E*-Wertes ist zu ersehen, dass eine möglichst genaue Kenntnis der Struktur des Bodens erforderlich ist. Diese Kenntnis wird nur durch entsprechende Sondierbohrungen, die wohlüberlegt in der Umgebung des Schachtes anzuordnen sind, vermittelt, bzw. durch die sachgemässe Auswertung der entnommenen Proben. Eine Untersuchung des beim Vortrieb ausgespülten Materiales lässt lediglich einen Rückschluss als Kontrolle auf die Grösse der Filtergalerie zu, ist aber niemals geeignet zu einer Beurteilung des Bodens und kann überhaupt nicht mehr zu einer Bemessung herangezogen werden, da es hierzu im Zeitpunkt des Spülens bereits zu spät ist.

*

Bis heute sind vier Horizontalbohrverfahren bekannt geworden, von denen aber lediglich zwei, und zwar das amerikanische Ranney-Verfahren und das schweizerische Fehlmann-Verfahren, durchgedrungen sind. Die übrigen Verfahren sind der Fachwelt kaum bekannt und stellen nur immer weiter verkomplizierende Lösungen nach dem Prinzip des alten und einfachen amerikanischen Verfahrens dar (Schlagvortrieb, Drehvortrieb, Vibrationsvortrieb), dessen prinzipielle Eigentümlichkeit ja bei allen späteren Verfahren immer wieder mehr oder weniger abgewandelt wird. Nach amerikanischem Verfahren wurden bisher 217 Anlagen ausgeführt und es liegen 14jährige Bau- und Betriebserfahrungen vor; das schweizerische Verfahren wurde im Sommer 1947 durch seine erste Anlage bekannt und es sind derzeit zwölf Anlagen fertiggestellt. Die obenstehende Tabelle gibt eine Uebersicht der wichtigsten Daten aller bis September 1950 fertiggestellten Horizontalbrunnen nach beiden Systemen.

Ueber bautechnische Details beider Verfahren, die ja aus Veröffentlichungen hinreichend bekannt sind, sei hier nur insoweit berichtet, als dies zur Beseitigung gewisser Unklarheiten notwendig erscheint. Hinsichtlich des Bestrebens, ein Rohr horizontal vom Brunnenschacht aus mittels hydraulischer Pressen in den Boden einzutreiben, besteht zwischen beiden Verfahren kein Unterschied. Während aber nach Ranney sofort das starkwandige Filterrohr von rund 35 kg/m Gewicht eingepresst wird, benutzt Fehlmann zum Vortrieb schwere Vollwandstahlrohre von 15 bis 20 mm Wanddicke und einem Gewicht bis über 100 kg/m, die nach Einbau eines nur 2 bis 3 mm starken Filters wieder zurückgezogen werden müssen. Der Einbau ähnelt also dem eines Vertikalbrunnens, wobei allerdings auf das Einbringen eines Filterkiesmantels verzichtet werden muss. Beim Ranneybrunnen stellt die entsandete Filtergalerie eines der charakteristischen Merkmale dar. Das schweizerische Verfahren beschränktsich lediglich auf die Entsandung vor dem Piloten, denn aus der Beschreibung des Verfahrens geht hervor, dass das ausgespülte Bohrgut die Grundlage für ein Profil ergäbe. Wären also diesem ausgespülten Bohrgut auch die gewaltigen Sandmassen beigemischt, die beim Ranney-Prozess dem Boden entzogen werden und die bis 1000 l/m Vortrieb erreichen, dann könnte gar kein Profil rekonstruiert werden, da das am Spülende ankommende Material gar keiner natürlichen Bodenzusammensetzung mehr entspricht, sondern nur mehr einen erwünschten Abraum aus verschiedenen Bereichen des umliegenden Bodens darstellt. Da beim Fehlmann-Verfahren zwischen Bohrrohr-Innen- und Filterrohr-Aussendurchmesser 12 bis 13 mm Spielraum bestehen muss, ergibt sich, dass beim Rückzug der Bohrrohre ein Hohlraum von 21 bis 26,5 mm rund um das Filterrohr verstürzen muss. Dieser Versturz ist nur zulässig bei nicht entsandetem Boden oder bei allgemein

Uebersicht über ausgeführte Brunnen (Sept. 1950)

	System Ranney	System Fehlmann
Fertige Anlagen	217	12
Ausgeführte Gesamtbohrlänge	51 500 m	1635 m
Mittlere Länge der Bohrungen pro Brunnen	237 m	136 m
Mittlere Länge der Einzelbohrung	50 m	17 m
Grösste Einzelbohrlänge	115 m	33 m
Grösste Ergiebigkeit eines Brunnens	1170 l/s	300 l/s
Kleinste Ergiebigkeit eines Brunnens	34 l/s	15 l/s
Mittlere Ergiebigkeit eines Brunnens	335 l/s	136 l/s
Mittlere Ergiebigkeit pro m Rohr	1,44 l/s	1,0 l/s
Schlitzgrösse	38 × 9, 40 × 7 mm 40 × 5 mm	25 × 5 mm 25 × 1 mm
Schlitzfläche	rd. 20 %	rd. 32 %

grobem Korn, da bei etwa gebildeter Filtergalerie diese unweigerlich zerstört werden müsste. Gegenüber dem Ranneyverfahren eignet sich demnach das Fehlmannverfahren bei überwiegend grobkörnigen Böden, wo es auf die künstliche Schaffung einer Stützschicht gar nicht ankommt und wo das Hauptaugenmerk auf den schwierigen Vortrieb zu richten ist. Man wird in diesen Fällen auch die durch den doppelten hydraulischen Einpress- und Rückzugprozess gegebene Mehrarbeit gerne in Kauf nehmen. Die Anwendungsbereiche der Ranneymethode hat die 14jährige Bauerfahrung selbst abgesteckt. Man weiss heute, dass die Spülgrenzen zwischen etwa 100 und 1000 l Spülmaterial pro m Vortrieb liegen. Man kann demnach den Grenzbereich der Anwendung zwischen dem amerikanischen und dem schweizerischen Verfahren durch die 100 l-Spülgrenze kennzeichnen, da unter 100 l Spülgut bereits ausgesprochene Grobsedimentation vorliegt. Das Ranneyverfahren erreicht demnach seine höchste Wirtschaftlichkeit in den grossen, ausgedehnten fein- bis mittelkörnigen und gemischtkörnigen Tal-Alluvionen in den Flachlandgebieten, sowie in den grossen Gebirgstälern der Alpen.

Nicht oder schlecht geeignet sind Horizontalbrunnen überhaupt in dichten, festgelagerten oder konglomeratartig verfestigten Böden, besonders dann, wenn stark geneigte Schichthorizonte sehr unregelmässig ausgebildete Profile auf engstem Raum erwarten lassen.

Wettbewerb für eine Schulhausanlage im Dägelsteinfeld in Sursee [1])

DK 727.1(494.27)

Wir erhalten folgende **Zuschrift**, der wir gerne Raum geben, da wir mit dem Verfasser der Meinung sind, eine offene Aussprache über die aufgeworfenen Probleme sei nützlich. Red.

Zu Ihren allgemeinen Bemerkungen (SBZ 1950, Nr. 45, S. 624*) über Schulhauswettbewerbe der letzten Jahre erlaube ich mir, eine Kritik anzubringen. Sie rühmen beim Wettbewerb Sursee speziell den Entwurf Jauch, als eine quasi in die Zukunft weisende Lösung. Ich bin der Ansicht, dass dieser Entwurf, mit einem viergeschossigen Klassentrakt, ohne irgendwelche Differenzierung nach Altersstufen, einen gewaltigen Rückschritt bedeutet. Selbst wenn es sich um eine Mittelschule handelt, frage ich Sie: Wo bleibt da der Massstab des Kindes gewahrt? Die hohen Klassenfassaden erinnern eher an ein Verwaltungsgebäude. Weiter frage ich: Was passiert mit dem grossen, im Schatten des viergeschossigen Traktes gelegenen Platz, genannt «Vorhof»? Der einzige Eingang, der unmittelbar an diesen Platz anschliesst, führt zur Abwartwohnung; bis man von diesem Riesenplatz die Haustüre der Gewerbeschule findet, muss man vorerst noch einen Plattenweg von 30 m Länge überqueren. Einen weiteren schwachen Punkt stellen die Nebenräume der Turnhalle dar; diese sind auf engstem Raum in einen Teil des Klassentraktes hineingequetscht, mit mangelhafter Verbin-

[1]) Der Verfasser des an dritter Stelle prämiierten Entwurfes (S. 626) heisst nicht E. Bürgin, sondern Dipl. Arch. *E. Bürgi*, Luzern.