

# B R U N N E N FÜR GRUNDWASSERGEWINNUNGSANLAGEN

## S T U D I E ZU DEN BEMESSUNGSGRUNDLAGEN

Bearbeiter: Dr.-Ing. L. Luckner  
Forschungsgruppe "Grundwasserhydraulik"  
des IfW Berlin / TU Dresden

unter Mitarbeit von

|                        |                                       |
|------------------------|---------------------------------------|
| Dr.-Ing. J. Ziems †    | TU Dresden<br>Sektion Wasserwesen     |
| Dr.-Ing. D. Peukert    | FG "Grundwasserhydraulik"             |
| Dipl.-Math. K. Tiemer  | IfW Berlin                            |
| Dipl.-Ing. D. Eichhorn | PGH Brunnenbau Wilschdorf             |
| Dipl.-Ing. D. Wissel   | WTZ der VVB WAB                       |
| Ing. Sorge             | VEB Projektierung<br>Wasserwirtschaft |

VEB PROJEKTIERUNG WASSERWIRTSCHAFT HALLE

IG 131/151/70

Dem Andenken  
unseres Freundes und Kollegen  
Dr.-Ing. Jürgen Z i e m s  
gewidmet

Von Anfang an maßgebend an der Ausarbeitung dieser Studie und der zugehörigen Standards beteiligt, war es Dr.-Ing. Jürgen Ziems nicht mehr vergönnt, ihre endgültige Fertigstellung mitzerleben. Alle, die ihn kannten und fachlich mit ihm zusammenarbeiteten, empfinden den plötzlichen und unerwarteten Tod dieses ausgezeichneten Wissenschaftlers und Praktikers als einen äußerst schmerzlichen Verlust.

Sein fachliches Wirken war vornehmlich auf die Probleme der Verformungsbeständigkeit von Lockergesteinen unter dem Einfluß der Wirkungen des unterirdischen Wassers gerichtet. Durch langjährige praktische Erfahrungen als Bauleiter bei Dammbauten und durch eine umfassende intensive wissenschaftliche Arbeit hatte sich Dr.-Ing. Ziems als Fachmann auf diesem Gebiet hohe Anerkennung im In- und Ausland erworben.

Eines seiner wichtigsten Ziele war die Überführung seiner Forschungsergebnisse in die Praxis, um die investitionsintensiven wasserbaulichen Vorhaben effektiver gestalten zu können. Mit dem dritten Kapitel dieser Studie "Grundlagen der Stabilität von Erdstoffiltern im Brunnenbau" wird den Fachkollegen eine der letzten Arbeiten von Dr.-Ing. Ziems übergeben. Der Tod riß ihn mitten aus einer fruchtbaren Schaffensperiode.

Die großen wissenschaftlichen Leistungen Dr.-Ing. Ziems' und seine hohen menschlichen Qualitäten sind uns Verpflichtung, das von ihm begonnene Werk in seinem Sinne weiterzuführen!

## Vorwort

In vielen hochentwickelten Industrieländern besteht ein Mißverhältnis zwischen dem natürlichen Wasserdargebot und dem Wasserbedarf der Industrie, der Landwirtschaft und der Bevölkerung. In kaum einem Industrieland der Welt ist dieser Widerspruch so ausgeprägt wie in der DDR. Diese Situation bestimmt die Notwendigkeit, die Einwirkung auf den natürlichen Wasserkreislauf unter Einbeziehung aller wissenschaftlichen und technischen Möglichkeiten derart vorzunehmen, daß eine höchstmögliche Ausnutzung des natürlichen Wasserdargebotes entsprechend den gesellschaftlichen Bedürfnissen erfolgen kann.

Bei der Sicherung der Wasserbereitstellung wird, wie auch in vielen anderen Ländern, der Grundwassergewinnung eine immer größere Bedeutung zukommen. Die Wassergewinnung aus dem Untergrund erfolgt heute fast ausschließlich durch Vertikalfilterbrunnen. Alle übrigen Fassungelemente, wie Schachtbrunnen, Horizontalfilterbrunnen, Sickerleitungen u. a. besitzen hingegen nur für Spezialfälle größere Bedeutung. Jährlich investiert die Volkswirtschaft der DDR beträchtliche Summen in den Bau von Vertikalfilterbrunnen, deren Planung und Ausführung sich bisher vorwiegend auf Erfahrungswerte und empirische Berechnungsgleichungen stützt. Es ist deshalb das Anliegen der vorliegenden Studie, den Fachleuten der Wassererschließung und der Entwässerungstechnik einen rezenten Überblick über die Brunnenberechnung (Kap. 1), die Konstruktion und Gestaltung der Brunnenfilter (Kap. 2) und die Grundlagen der Stabilität von Erdstoffiltern im Brunnenbau (Kap. 3) zu geben und die theoretischen Grundlagen für eine neue, zweckmäßige Bemessungsmethodik darzulegen.

Da die modernen Verfahren der Brunnenberechnung jedoch teilweise erheblich von den bisher gebräuchlichen abweichen, teilweise äußerst kompliziert sind und ihre unmittelbare Anwendung den Praktikern nicht immer zugemutet werden kann, wurde auf der Grundlage der Studie ein Werkstandard des VEB Projektierung Wasserwirtschaft Halle (Saale) erarbeitet, der eine neue Bemessungsmethodik für Wasserversorgungsbrunnen darlegt.

Dieser Werkstandard gliedert sich in vier Blätter

WAPRO 1.42. Blatt 1 Bemessungsgrundlagen für Brunnen von  
Grundwassergewinnungsanlagen; Grundsätze

Blatt 2 -; geohydraulische Berechnungen

Blatt 3 -; Konstruktion und Gestaltung von Brunnenfiltern

Blatt 4 -; Verfahrensweg

und ist ein selbständiges Arbeitsmittel. Die Studie und der Werkstandard sollen allen Fachkollegen die Möglichkeit geben, Brunnen für Grundwassergewinnungsanlagen nach modernsten Gesichtspunkten zu projektieren und zu bauen.

VEB Projektierung Wasserwirtschaft Halle (Saale)

Dipl.-Ing. Wiechmann  
Technischer Direktor

Im August 1970

## Inhaltsverzeichnis

1. Brunnenberechnung
  - 1.0. Symbole
  - 1.1. Ableitung der Grundgleichungen
  - 1.2. Die Lösung der Grundgleichung
  - 1.3. Superposition der Grundlösungen
    - 1.3.1. Zeitliche Überlagerung
    - 1.3.2. Örtliche Überlagerung
      - 1.3.2.1. Berechnung von Brunnengruppen
      - 1.3.2.2. Berechnung von Brunnen in begrenzten Grundwasserleitern
  - 1.4. Spezielle Lösungsmethoden
    - 1.4.1. Konforme Abbildungen
      - 1.4.1.1. Transformationseigenschaften
      - 1.4.1.2. Berechnung von Einzelbrunnen
      - 1.4.1.3. Anwendungsbeispiele
    - 1.4.2. Separationsmethode
  - 1.5. Erfassung natürlicher Berandungen
    - 1.5.1. Äußere Berandung
    - 1.5.2. Innere Berandung
  - 1.6. Brunnengalerien mit Heberleitung
- Literaturverzeichnis 1
2. Konstruktion und Gestaltung von Brunnenfiltern
  - 2.1. Grundsätzlicher Aufbau von Vertikalfilterbrunnen
    - 2.1.1. Die Bohrung
    - 2.1.2. Die Bauteile
  - 2.2. Allgemeine Konstruktionsregeln
  - 2.3. Die Problematik der Brunnenalterung
  - 2.4. Nachbehandlung der Vertikalfilterbrunnen
- Literaturverzeichnis 2
3. Grundlagen der Stabilität von Erdstoffiltern im Brunnenbau
  - 3.0. Verwendete Symbole
  - 3.1. Begriffe
  - 3.2. Zur Porengeometrie nichtbindiger Erdstoffe
  - 3.3. Einige Gesetzmäßigkeiten der inneren Suffosion
    - 3.3.1. Nachweis der geometrischen Suffosionssicherheit <sup>7</sup> S.G
  - 3.4. Zur mechanischen Kolmation nichtbindiger Erdstoffe
  - 3.5. Einige Gesetzmäßigkeiten der Kontakterosion
  - 3.6. Zur Bemessung der Filterrohrschlitzweiten bzw. der Maschenöffnungen des Filtergewebes
    - 3.6.1. Normalfall bei Anwendung von Filterschüttungen
    - 3.6.2. Sonderfall ohne Anwendung von Filterschichten
- Literaturverzeichnis 3

## 1. Brunnenberechnung

### 1.0. Symbole

|                |  |   |
|----------------|--|---|
| B              | [ m ]  | Speisungsfaktor (leakage-factor) s. WAPRO 1.42. Blatt 2 Bild 3                            |
| H              | [ m ]  | Lage des Ruhegrundwasserspiegels über der Sohle   |
| h              | [ m ]  | Höhenlage der freien Grundwasseroberfläche bzw. der Druckhöhenfläche über der Bezugsebene |
| k              | [ ms <sup>-1</sup> ]                               | Durchlässigkeitsbeiwert des Erdstoffes  |
| M              | [ m ]  | Mächtigkeit des Grundwasserleiters  |
| n              | [ / ]  | beliebige Anzahl  |
| n <sub>0</sub> | [ / ]  | freies entwässerbares Porenvolumen  |
| P              | [ / ]  | beliebiger Punkt im Untersuchungsgebiet   |
| Q              | [ m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> ]                 | Fördermenge eines Brunnens  |
| R              | [ m ]  | Reichweite  |
| Re             | [ / ]  | Reynoldssche Zahl   |
| r              | [ m ]  | Abstand eines Punktes von der Brunnenachse, Zylinderkoordinate                            |
| r <sub>0</sub> | [ m ]  | Radius der Brunnenbohrung   |
| r <sub>a</sub> | [ m ]  | äußerer Radius des Kiesmantels  |
| r <sub>k</sub> | [ m ]  | Entfernung bis zum Ringgraben   |
| r <sub>i</sub> | [ m ]  | innerer Radius des Kiesmantels  |
| s              | [ m ]  | Absenkung   |
| S              | [ / ]  | Speicherkoefizient des Grundwasserleiters   |
| S <sub>0</sub> | [ m <sup>-1</sup> ]                                | spezifischer Speicherkoefizient   |
| s <sub>0</sub> | [ m ]  | Absenkung des Wasserspiegels im Brunnen   |
| T              | [ m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> ]                 | Profildurchlässigkeit (Transmissibility)  |
| t              | [ s ]  | Zeit  |
| v <sub>i</sub> | [ ms <sup>-1</sup> ]                               | Filtergeschwindigkeit an der Stelle r <sub>i</sub>  |
| v <sub>H</sub> | [ m <sup>3</sup> m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> ] | Grundwasserneubildung bzw. Infiltrationsrate  |
| W              | [ / ]  | Brunnenfunktion   |
| x              | [ m ]  | kartesische Koordinate  |
| y              | [ m ]  | kartesische Koordinate  |
| z <sub>R</sub> | [ m ]  | Höhenlage der freien GW-Oberfläche über z = 0   |
| z              | [ m ]  | kartesische Koordinate  |
| Z              | [ m <sup>2</sup> ]                                 | Potentialdifferenz Δφ   |
| φ              | [ m <sup>2</sup> ]                                 | GIRINSKIJ'- Potential   |
| ψ              | [ / ]  | spezifisches Potentialdifferenz   |
| λ              | [ m ]  | Entfernung des Brunnens von der geradlinigen Kontur                                       |
| ν              | [ m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> ]                 | kinematische Zähigkeit  |
| ρ              | [ m ]  | Abstand des imaginären Brunnens vom Punkt P   |
| σ              | [ / ]  | Argument der Brunnenfunktion  |

1.1. Ableitung der Grundgleichungen

Als Grundgleichung wird das mathematische Modell der nichtstationären Grundwasserströmung unter Verwendung des Girinskij-Potentials genutzt / 1 /, / 2 /, / 3 /.

Diese Gleichung lautet für  $k = \text{const.}$ :

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + \frac{v_N}{k} + \frac{\phi_s - \phi}{B^2} = \frac{S}{k} \cdot \frac{\partial^2 z_R}{\partial t} \quad (1)$$

$\phi_s = \phi$ -Wert der speisenden Schicht

Die Gleichung (1) ist nichtlinear. Sie wird linearisiert, indem

$$\frac{S}{k} \cdot \frac{\partial^2 z_R}{\partial t} = \left( \frac{S}{T} \right) \frac{\partial \phi}{\partial t}$$

gesetzt und für  $(S/T)$  ein örtlicher und zeitlicher Mittelwert berücksichtigt wird ( $S/T = \text{const.}$ ).

Der zeitliche Verlauf der Änderung des Potentials  $\phi$  ist proportional zu  $(S/T)$ , weshalb dieser Koeffizient als geohydraulische Zeitkonstante bezeichnet werden kann.

Ein voll befriedigender Ansatz für den zeitlichen und örtlichen Mittelwert von  $(S/T)$  konnte bisher noch nicht gefunden werden.

Zeitlicher Mittelwert der geohydraulischen Zeitkonstanten  $(S/T)_t$ :

Für gespanntes Grundwasser ist  $(S/T)_t = \text{const.}$  Bei ungespanntem Grundwasser wird für die Festlegung des zeitlichen Mittelwertes in Anlehnung an Modellversuche empfohlen, bei periodisch schwankenden Wasserständen den Wert  $(S/T)$  zu verwenden, der sich für die Lage des Grundwasserspiegels ergibt, um die der Spiegel schwankt.

Für einsinnig verlaufende Absenkungs- oder Anstiegsvorgänge sollte für den zeitlichen Mittelwert dagegen

$$\left( \frac{S}{T} \right)_t = \alpha = \frac{1}{3} (2\alpha_{\text{Ende}} + 1\alpha_{\text{Anfang}}) \quad (2)$$

$\alpha_{\text{Ende}}$  - örtlicher Mittelwert zur Zeit  $t$ , für die  $\phi$  berechnet wird

$\alpha_{\text{Anfang}}$  - örtlicher Mittelwert zur Zeit  $t = 0$  (Ausgangswert)

gesetzt werden.

Örtlicher Mittelwert der geohydraulischen Zeitkonstanten  $(S/T)_{x,y}$ :

Für die Festlegung des örtlichen Mittelwertes muß der geohydraulisch wirksame  $S$ -Wert und  $T$ -Wert ermittelt werden.

Örtlicher Mittelwert des Speicherkoeffizienten  $S$ :

Für gespanntes und ungespanntes Grundwasser ist basierend auf Modellversuchen der örtliche Mittelwert für  $S$  in erster Näherung als gewogener Mittelwert des gesamten von der Fassungsanlage beeinflussten Gebietes festzulegen, wobei jedem Teilgebiet als Gewicht seine Fläche zugeordnet wird.

Örtlicher Mittelwert der Profildurchlässigkeit T:

Für gespanntes Grundwasser ist ein repräsentativer Wert  $T = km$  für die Fassungsanlage festzulegen. Bei der Bestimmung des gewonnenen Mittelwertes von  $T$  wäre jedem Teilgebiet als Gewicht das Produkt seiner Fläche mit dem dort auftretenden Potentialgefälle zuzuordnen. Für die Einschätzung des örtlichen Mittelwertes werden deshalb die  $T$ -Werte in Fassungsnähe besonders berücksichtigt. Für Einzelbrunnen ist der im Pumpversuch bestimmte  $T$ -Wert repräsentativ. Bei Brunnengruppen ist für die gesamte Fassungsanlage ein repräsentativer  $T$ -Wert festzulegen.

Für ungespanntes Grundwasser ist bei der Bestimmung eines repräsentativen Wertes  $T = kh$  für die Fassungsanlage einmal die Festlegung eines über die Höhe  $z$  (von  $z = 0$  bis  $z = h$ ) und in der  $xy$ -Ebene gemittelten  $k$ -Wertes und zum anderen die Festlegung der Lage einer fiktiven horizontalen Sohle des Grundwasserleiters ( $z = 0$ ), auf die sich die  $h$ -Werte beziehen, notwendig. Bei ihrer Festlegung wird die Lage der tatsächlichen Sohle in dem Abschnitt, in dem sich die Brunnen der Fassungsanlage befinden, am stärksten berücksichtigt. Das gilt in gleicher Weise für die über die Höhe gemittelten  $k$ - und  $h$ -Werte zur Festlegung des repräsentativen  $T$ -wertes.

Der so bestimmte  $k$ -Wert bei gespanntem und ungespanntem Grundwasser ist auch bei allen im nachfolgenden abgeleiteten Gleichungen zur Bestimmung der Wassermenge  $Q$  oder der Absenkung  $s$  einzusetzen. Diese Gleichungen werden die tatsächlichen Verhältnisse um so besser erfassen, je widerspruchsfreier sich der zeitliche und örtliche Mittelwert für  $(S/T)$ , der mittlere  $k$ -Wert und bei ungespanntem Grundwasser die Lage der fiktiven horizontalen Sohle festlegen lassen. Bei der Bestimmung dieser örtlichen und zeitlichen Mittelwerte beginnt man dabei stets mit der Festlegung der örtlichen Mittelwerte für den Ausgangszustand, führt damit die Berechnungen durch, schätzt daraus die örtlichen Mittelwerte zum Berechnungszeitpunkt ab, bildet die zeitlichen Mittelwerte und wiederholt die Berechnungen nur, wenn diese allzusehr von den Ausgangswerten abweichen.

Neben der Festsetzung örtlicher und zeitlicher Mittelwerte für  $(S/T)$  und  $k$  und der Lage der fiktiven Sohle ist die Ermittlung einer repräsentativen Grundwasserneubildung besonders problematisch. Zur Vermeidung dieser erneuten Schwierigkeit wird heute von in- und ausländischen Fachleuten empfohlen, nur die Änderungen des natürlichen Zustandes nach der Inbetriebnahme der Brunnenanlage zu untersuchen. Formuliert man Gl. (1) zuerst für den natürlichen Zustand und dann für den gestörten Zustand nach Inbetriebnahme der Brunnen, so ergibt sich die Gl. (3), wenn man annimmt, daß die Grundwasserneubildung  $v_N$  und die Druckverhältnisse in der speisenden Schicht vor und nach der Inbetriebnahme der Brunnen gleich groß sind:

Natürlicher Zustand: 
$$\frac{\partial^2 \vartheta_n}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \vartheta_n}{\partial y^2} + \frac{v_N}{k} + \frac{\vartheta_a - \vartheta_n}{B^2} = \left(\frac{S}{T}\right) \frac{\partial \vartheta_n}{\partial t}$$

$\vartheta_n$  =  $\vartheta$ -Wert des natürlichen, ungestörten Zustandes

$\vartheta_a$  =  $\vartheta$ -Wert der speisenden Schicht

Gestörter Zustand: 
$$\frac{\partial^2 \vartheta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial y^2} + \frac{v_N}{k} + \frac{\vartheta_a - \vartheta}{B^2} = \left(\frac{S}{T}\right) \frac{\partial \vartheta}{\partial t}$$

$\vartheta$  =  $\vartheta$ -Wert des gestörten Zustandes nach der Inbetriebnahme der Brunnen

mit  $\vartheta_n - \vartheta = z$  erhält man nach der Subtraktion beider Gleichungen

$$\frac{\partial^2 z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 z}{\partial y^2} - \frac{z}{B^2} = \left(\frac{S}{T}\right) \frac{\partial z}{\partial t} \quad (3)$$

Die Höhenlage des Bezugshorizontes für die h-Werte ( $z = 0$ ) ist dabei für die gespannte Strömung frei wählbar.

Für die ungespannte Strömung ist der Bezugshorizont identisch mit der fiktiven horizontalen Sohle des Grundwasserleiters.

### 1.2. Die Lösung der Grundgleichung

Für die rotationssymmetrische Grundwasserströmung nimmt die Gleichung (3) folgende Gestalt an (s. a. / 1 /, / 2 /, / 3 /):

$$\frac{\partial^2 Z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial Z}{\partial r} - \frac{Z}{B^2} = \left( \frac{S}{T} \right) \cdot \frac{\partial Z}{\partial t} \quad (4)$$

Setzt man in diese Gleichung die auf  $Q/(4\pi k)$  bezogene spezifische Potentialdifferenz  $\psi$  ein,

$$\psi = \frac{Z}{Q/(4\pi k)} \quad (5a)$$

mit:

$$Z = \begin{cases} 0,5 (h_n^2 - h^2) & \text{ungespanntes Grundwasser} \\ M (h_n - h) = M \cdot s & \text{gespanntes Grundwasser} \end{cases} \quad (5b)$$

und ist  $Q/(4\pi k) = \text{const.}$  (konst. Entnahme), so ergibt sich folgende partielle Differentialgleichung für  $\psi$ :

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial \psi}{\partial r} - \frac{\psi}{B^2} = \left( \frac{S}{T} \right) \cdot \frac{\partial \psi}{\partial t} \quad (6)$$

Die Lösung der Grundgleichung (6) wurde für  $\psi/B^2 = 0$  und nachfolgende Bedingungen

Anfangsbedingung  $\psi(r, 0) = 0$   
äußere Randbedingung  $\psi(\infty, t) = 0$  (unendlich ausgedehnter Grundwasserleiter)

innere Randbedingung  $\lim_{r \rightarrow 0} r \frac{\partial \psi}{\partial r} = -2$

von Theis 1935 gefunden / 3 /. Sie lautet:

$$\psi = W(u) \quad (7)$$

mit  $u = \frac{r^2 S}{4 T t}$

Die Brunnenfunktion  $W(u) = -Ei(-u)$  wurde im WAPRO 1.42. Blatt 2 tabellarisch erfasst.

Entwickelt man  $W(u)$  als Reihe / 3 /, so erkennt man, daß für kleinere Werte von

$$W(u) \approx \ln(1,78 u)$$

ist. Der dabei begangene Fehler läßt sich in Abhängigkeit von  $u$  angeben. Von diesem Ersatz der Brunnenfunktion durch die ln-Funktion wird im WAPRO 1.42. Gebrauch gemacht.

Bei der Berechnung von Brunnen mit konstanter Brunnenabsenkung ist  $Z(r_0)$  eine Konstante,  $Q$  dagegen eine Funktion der Zeit. Die Gl. (6) ist für diesen Fall nicht gültig. Es ist Gl. (4) zu lösen.

Die Lösung der Grundgleichung (4) wurde für  $Z/B^2 = 0$  und nachfolgende Bedingungen

Anfangsbedingung  $Z(r, 0) = 0$   
 äußere Randbedingung  $Z(\infty, t) = 0$  (unendlich ausgedehnter GW-Leiter)  
 innere Randbedingung  $Z(r_0, t) = \text{const}$  (konstante Absenkung im Brunnen)

zur Bestimmung der Brunnenleistung  $Q = Q(t)$  von Jacob und Lohmann gefunden / 4 /. Sie lautet:

$$Q = Q(t) = 2 \pi k Z(r_0) / G(\alpha^*)$$

mit  $\alpha^* = \frac{Tt}{Sr_0^2}$  (8)

Die Ermittlung von  $Z(r, t)$  ist nachfolgend durch Überführung der Funktion  $Q = Q(t)$  in eine Stufenfunktion mit Hilfe der Gl. (10) mit  $\mathcal{J}(r, t - \tau_{j-1})$  nach Gl. (7) möglich.

Die tabellierte Funktion  $G = G(\alpha^*)$  ist im WAPRO 1.42. Blatt 2 enthalten.

Es läßt sich zeigen, daß  $G = G(\alpha^*)$  für große  $\alpha^*$ -Werte wiederum durch eine ln-Funktion approximiert werden kann.

Die Berechnung der Fördermenge  $Q$  von Brunnen mit konstanter Brunnenabsenkung hat für die Berechnung von Fall- und Steckfilterbrunnen bei der Tagebauentwässerung oder von artesischen Brunnen aller Art (wie beispielsweise der Entlastungsbrunnen von Dammbauwerken u. ä. m.) große Bedeutung. Auch Pumpversuche wurden erfolgreich mit konstanter Absenkung gefahren.

Für große Zeiten läßt sich ein Brunnen mit konstanter Absenkung nach der Gleichung von Theis berechnen:

$$Q = \frac{4\pi k Z(r_0)}{W(u)} \quad \text{mit } Z(r_0) = \text{const.}$$

Die Grenzen hierfür werden mit den zugehörigen Fehlern im WAPRO 1.42. ausgewiesen.

Die Lösung der Grundgleichung (6) wurde für  $\mathcal{J}/B^2 \neq 0$  und nachfolgende Bedingungen

Anfangsbedingung  $\mathcal{J}(r, 0) = 0$   
 äußere Randbedingung  $\mathcal{J}(\infty, t) = 0$  (unendlich ausgedehnter GW-Leiter)  
 innere Randbedingung  $\lim_{r \rightarrow 0} r \frac{\partial \mathcal{J}}{\partial r} = -2$

von Hantush gefunden / 3 /. Sie lautet:

$$\mathcal{J} = W(u, \frac{r}{B}) \quad (9)$$

mit  $u = \frac{r^2 S}{4 T t}$

Die Brunnenfunktion für den "unendlichen GW-Leiter"  $W(u, r/B)$  wurde im WAPRO 1.42. Blatt 2 graphisch dargestellt.

Die Lösung der vollständigen Grundgleichung (6) wurde durch Ausnutzung der Laplace-Transformation erreicht. Die Ableitung wurde in / 3 / erläutert.

Durch das Glied  $\mathcal{J}/B^2$  in der Gleichung (6) wird eine Zusäckerung zum betrachteten Grundwasserleiter erfaßt, die proportional zu  $\mathcal{J}$  ist. Dies trifft zu, wenn der Grundwasserleiter durch eine relativ undurchlässige Schicht - wie z. B. eine Auelehm- oder Schlamm-schicht - abgedeckt ist, die vom Oberflächenwasser überstaut wird. Anstelle des Oberflächenwassers können auch hochdurchlässige Schichten treten, die vom Grundwasserleiter durch weniger durchlässige Schichten getrennt sind / 5 / , / 7 /. Die drei wichtigsten diesbezüglichen

hydrogeologischen Lagerungsformen wurden im WAFRO 1.42. ausgewiesen.

Ändert sich die Grundwasserneubildung proportional mit  $\varphi$ , so läßt sich diese Erscheinung ebenfalls durch Gl. (6) und die entsprechenden Lösungen erfassen. So ist auf diese Art und Weise in vielen Fällen eine Berücksichtigung der zunehmenden GW-Neubildung bei wachsender Absenkung näherungsweise möglich.

Eine Vereinfachung der Brunnenfunktion für "undichte Grundwasserleiter" (leaky aquifer) ist für große  $t$ -Werte und kleine  $r/B$ -Werte möglich. Hiervon wird im Werkstandard Gebrauch gemacht.

Aus den vorgestellten drei Lösungen Gl. (7), (8) und (9) der Grundgleichung (4) lassen sich nun eine Vielzahl weiterer Lösungen durch Superposition der Grundlösungen ableiten.

### 1.3. Superposition der Grundlösungen

Die Superposition ist gestattet, weil die Grundgleichungen (4) und (6) linear sind.

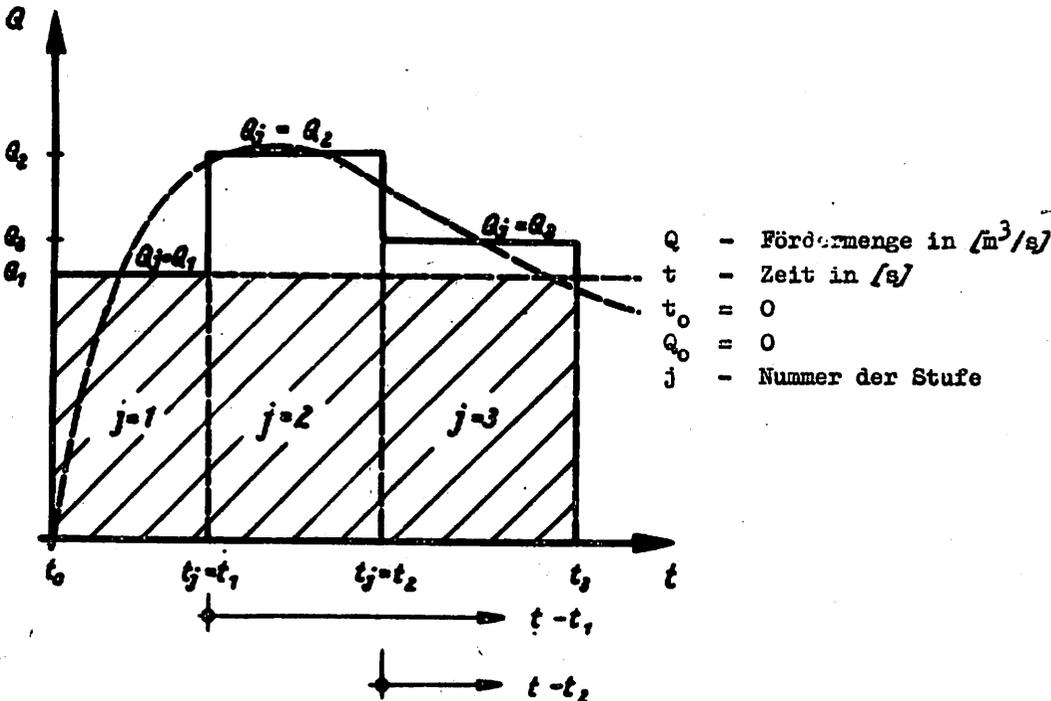
Durch Überlagerung der Lösungen von mehreren Brunnen entstehen auf diese Weise Lösungen für Brunnengruppen.

Ist die Fördermenge eines Brunnens nicht konstant und führt man ihre Abhängigkeit in eine Stufenfunktion über, so läßt sich diese Randbedingung durch Überlagerung berücksichtigen.

Die wesentlichsten Grundlagen des Superpositionsprinzips werden in /3/ erläutert:

#### 1.3.1. Zeitliche Überlagerung

Die stetige Funktion  $Q = Q(t)$  wird in eine Stufenfunktion (Flächenausgleich) mit möglichst wenigen Stufen übergeführt.



Ist nun die Lage des Wasserspiegels und damit die Größe  $Z$  (s. Gl. 5b) zur Zeit  $t$  gesucht, so kann man sich vorstellen, daß der Brunnen mit einer Förderleistung von  $Q = Q_1$  von  $t_0 = 0$  bis zur Zeit  $t$  betrieben wird. Die dadurch verursachte Potentialänderung  $Z_1$  ergibt sich daher zu:

$$Z_1 = Z(r, t)_1 = \frac{Q_1}{4\pi k} \cdot \varphi(r, t)$$

Von  $t_1$  beginnend stellen wir uns vor, daß ein zweiter Brunnen an der gleichen Stelle seine Förderung mit einer Leistung von  $Q = Q_2 - Q_1$  bis zur betrachteten Zeit  $t$  aufnimmt. Die dadurch (2. Stufe der Stufenfunktion) verursachte Potentialänderung  $Z_2$  ergibt sich daher zu:

$$Z_2 = Z(r, t - t_1) = \frac{Q_2 - Q_1}{4\pi k} \mathcal{J}(r, t - t_1)$$

Von  $t_2$  beginnend müssen wir uns vorstellen, daß ein dritter Brunnen an der gleichen Stelle in Betrieb geht. Es handelt sich hierbei um einen Schluckbrunnen mit der Leistung  $Q = Q_2 - Q_3$ . Die dadurch (3. Stufe der Stufenfunktion) hervorgerufene Potentialänderung  $Z_3$  beträgt somit:

$$-Z_3 = -Z(r, t - t_2) = \frac{Q_2 - Q_3}{4\pi k} \mathcal{J}(r, t - t_2)$$

Der tatsächlich auftretende Z-Wert zur Zeit  $Z(t)$  ergibt sich nun durch Superposition zu:

$$Z(r, t) = \sum_{j=1}^3 Z_j = \frac{1}{4\pi k} [ Q_1 \mathcal{J}(r, t) + (Q_2 - Q_1) \mathcal{J}(r, t - t_1) + (Q_3 - Q_2) \mathcal{J}(r, t - t_2) ]$$

und allgemein:

$$Z(r, t) = \sum_{j=1}^m Z_j = \frac{1}{4\pi k} \sum_{j=1}^m (Q_j - Q_{j-1}) \mathcal{J}(r, t - t_{j-1}) \quad (10)$$

gültig für  $t_{m-1} \leq t \leq t_m$

mit  $m$  - Nummer der Stufe, in die der Zeitpunkt  $t$  fällt, auf den sich  $Z = Z(t)$  bezieht

In dieser Form wurde im WAFRO 1.42. die zeitabhängige Förderleistung der Brunnen erfaßt.

Ein Sonderfall hierfür ist die Berechnung des Wiederanstieges im Brunnen nach Beendigung der Förderung. Hierbei ist  $Q_m = 0$  /3/, /4/.

In der gleichen Weise läßt sich eine Lösung für  $Z(r_0) = Z(r_0, t)$  aus der Grundlösung Gl. (8) aufbauen, wenn man  $Z(r_0) = Z(r_0, t)$  in eine Stufenfunktion überführt. Man erhält:

$$Q(r_0, t) = 2\pi k \sum_{j=1}^m \frac{Z(r_0)_j - Z(r_0)_{j-1}}{G(x_j^2)} \quad \text{mit} \quad \alpha_j = \frac{T(t - t_{j-1})}{Sr_0^2}$$

gültig für  $t_{m-1} \leq t \leq t_m$

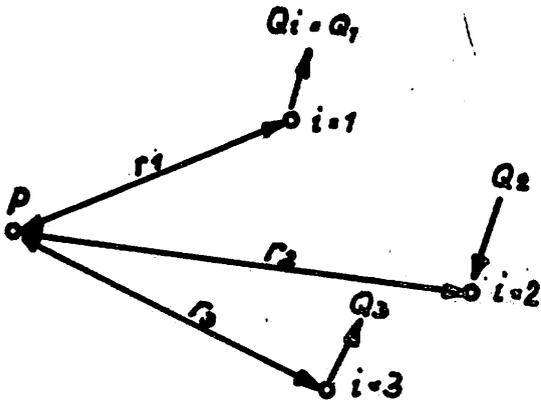
mit  $Z(r_0)_0 = t_0 = 0$

Diese Beziehung wurde ebenfalls im WAFRO 1.42. aufgenommen.

### 1.3.2. Örtliche Überlagerung

#### 1.3.2.1. Berechnung von Brunnengruppen

Soll die Lage des Grundwasserspiegels und damit der Z-Wert (s. Gl. 5b) am Punkt P berechnet werden, der sich infolge des Betriebes einer Brunnengruppe ergibt, so sind die Z-Werte am Punkt P, die sich infolge des Betriebes jedes einzelnen Brunnens der Gruppe ergeben, zu superponieren. Dabei ist zu beachten, daß das Strömungsfeld für jede Einzellösung die gleiche Ausdehnung aufweisen muß (gleiche Randbedingungen für das Gesamtsystem).



- n - Gesamtzahl der Brunnen
- i - Nummer des Brunnen
- $Q_i$  - Förderleistung des i-ten Brunnen
- $r_i$  - Entfernung des i-ten Brunnen vom Punkt P, in dem Z berechnet wird

Die Potentialdifferenz  $Z_p$  am Punkt P des Grundwasserleiters infolge des Betriebes des Brun-  
nens 1 mit der Förderleistung  $Q_1$  ergibt sich somit zu:

$$Z_{p,1} = Z(r_1, t)_1 = \frac{Q_1}{4\pi k} \mathcal{Y}(r_1, t)$$

durch den Betrieb des Schluckbrunnens 2 mit der Schluckleistung  $Q_2$  ergibt sich

$$Z_{p,2} = Z(r_2, t)_2 = \frac{-Q_2}{4\pi k} \mathcal{Y}(r_2, t)$$

und infolge des Betriebes des Brunnen 3 mit der Förderleistung  $Q_3$  ergibt sich

$$Z_{p,3} = Z(r_3, t)_3 = \frac{Q_3}{4\pi k} \mathcal{Y}(r_3, t)$$

Superponiert man alle diese Potentialdifferenzen, die sich infolge des Betriebes der Brun-  
nen einer Gruppe am Punkt P ergeben, so erhält man allgemein

$$Z(t)_p = \sum_{i=1}^n Z(r_i, t)_i = \frac{1}{4\pi k} \sum_{i=1}^n Q_i \mathcal{Y}(r_i, t) \quad (11)$$

Ist der Wasserspiegel im l-ten Brunnen zu berechnen, darf der Punkt P nur bis auf den Brun-  
nenmantel an die Brunnenachse herangerückt werden, da die Gleichungen nur für das Grundwas-  
serströmungsfeld, nicht aber für die Strömung im Brunnenfilter gültig sind. Es ist daher  
stets

$$r_i \geq r_{\text{Bohrung}, l}$$

einzuhalten.

Ist  $Q_i$  nicht konstant, sondern eine Funktion der Zeit  $Q_i = Q_i(t)$ , so ergibt sich die Poten-  
tialdifferenz  $Z_{p,i}$  am Punkt P infolge des Betriebes des i-ten Brunnen mit der Förderlei-  
stung  $Q_i$  entsprechend Gl. (10) zu:

$$Z_{p,i} = Z(r_i, t)_i = \frac{1}{4\pi k} \sum_{j=1}^n (Q_{i,j} - Q_{i,j-1}) \mathcal{Y}(r_i, t - t_{j-1})$$

Die Gl. (11) erhält damit folgende Form:

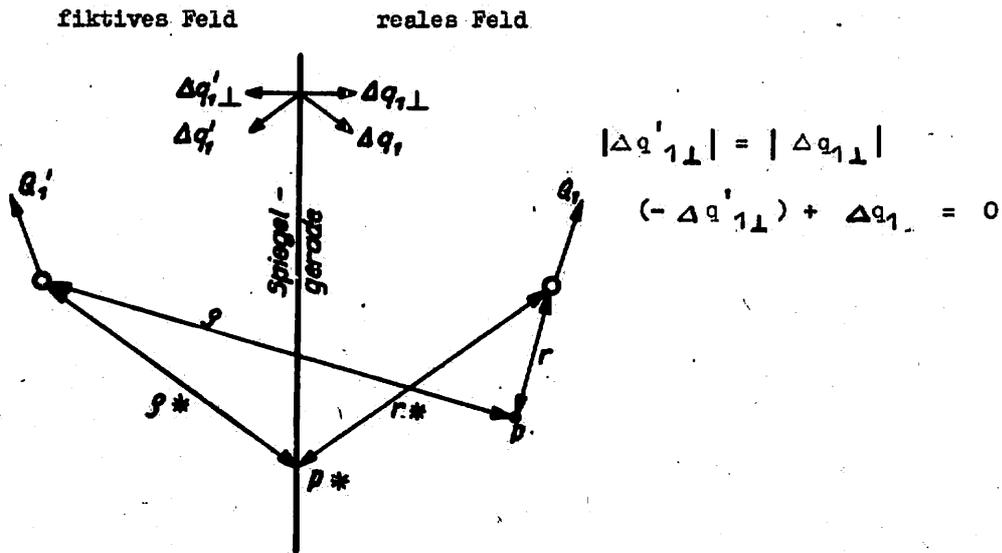
$$Z(t)_P = \sum_{i=1}^n Z(x_i, t)_i = \frac{1}{4\pi k} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (Q_{i,j} - Q_{i,j-1}) \mathcal{Y}(x_i, t - t_{j-1}) \quad (12)$$

wobei die Bezeichnungen mit denjenigen der Gl. (10) und (11) identisch sind.

1.3.2.2. Berechnung von Brunnen in begrenzten Grundwasserleitern

Mit Hilfe des Superpositionsprinzips ist es auch möglich, gewisse Randwertaufgaben zu lösen.

Ordnet man beispielsweise 2 Förderbrunnen mit  $Q_1 = Q_1 = Q$  s p i e g e l b i l d l i c h zu einer Geraden an,



so ist die Änderung von Z senkrecht zur Geraden gleich Null. Es existiert somit senkrecht zur Spiegelgeraden keine Fließbewegung. Betrachtet man nun nur das rechte Teilgebiet, so ist das Strömungsbild identisch mit dem des einseitig durch eine undurchlässige Berandung begrenzten Grundwasserleiters.

Für den einseitig durch eine undurchlässige Berandung begrenzten Grundwasserleiter gilt somit

$$Z_P = \frac{Q}{4\pi k} [ \mathcal{Y}(x) + \mathcal{Y}(q) ], \quad (13)$$

wobei der Abstand vom Punkt P zum gespiegelten Brunnen im linken fiktiven Teilgebiet ist.

Ordnet man spiegelbildlich zur Berandung im fiktiven linken Teilgebiet einen Schluckbrunnen an, dessen Aufnahmeleistung gleich der des betrachteten Förderbrunnens ist, so herrscht auf der Berandung stets die Bedingung  $Z = 0$  / 3 /. Solche Berandungen bilden beispielsweise Oberflächengewässer oder angrenzende Grundwasserleiter mit einem relativ großen T-wert im Vergleich zum T-wert des Grundwasserleiters, für den die Berechnung erfolgt.

Betrachtet man nun wiederum nur das rechte Teilgebiet als real, so ist das Strömungsbild identisch mit dem eines einseitig durch eine Berandung, auf der die Bedingung  $Z = 0$  gilt, begrenzten Grundwasserleiters. Für diesen Strömungstyp gilt somit:

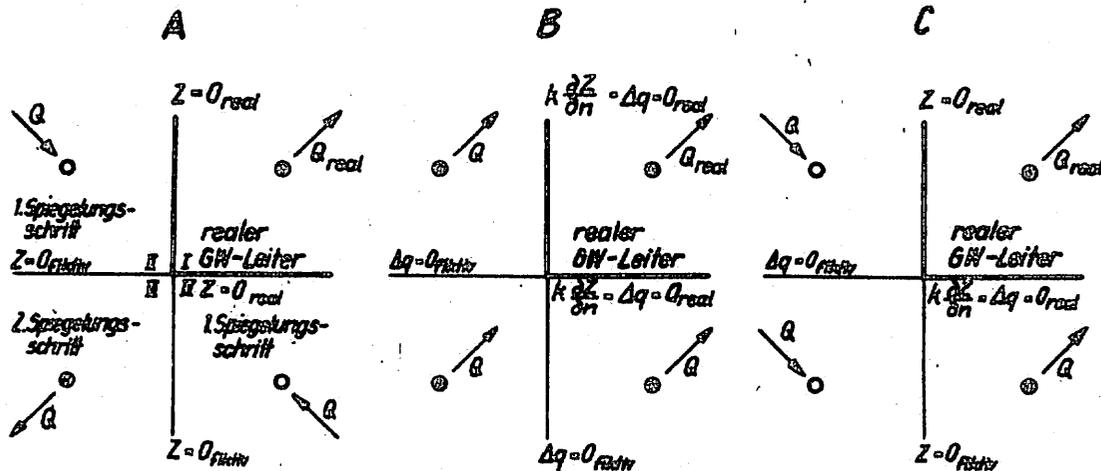
$$Z_P = \frac{Q}{4\pi k} [ \mathcal{Y}(x) - \mathcal{Y}(q) ] \quad (14)$$

Durch Superposition lassen sich nun in gleicher Form - wie vorher erläutert - Gleichungen für Brunnengruppen und für eine sich zeitlich ändernde Entnahmefunktion ableiten. Im WAPRO 1.42. wurden diese Beziehungen zusammengestellt.

Die Verallgemeinerung dieses Verfahrens liegt auf der Hand. Besteht der Rand des Untersuchungsgebietes aus einem Polygonzug, auf dem abschnittsweise  $Z = 0$  oder  $k \frac{\partial Z}{\partial n} = \Delta q = 0$  ist, und befinden sich in diesem realen Bereich endlich viele Entnahme- oder Schluckbrunnen, so werden diese zunächst an allen verlängerten Geraden, aus denen sich der Polygonzug zusammensetzt, gespiegelt. In den erhaltenen Spiegelungspunkten werden (entsprechend dem oben erläuterten Beispiel) fiktive Entnahme- bzw. Schluckbrunnen angeordnet. Diese so erhaltenen fiktiven Brunnen müssen nun wiederum an allen verlängerten Geraden der Berandung gespiegelt werden. Dieser Vorgang wiederholt sich solange, bis die Spiegelbilder zusammenfallen. In einigen Fällen gelingt das mit einer endlichen Zahl von Spiegelungen nicht.

Das Verfahren versagt, wenn ein Spiegelungsbrunnen in den realen Bereich des Grundwasserleiters fällt, weil sich sonst dort eine Unstetigkeitsstelle ergeben würde.

Bei Brunnen im zweiseitig-rechtwinklig begrenzten unendlich ausgedehnten Grundwasserleiter müssen zu jedem realen Brunnen drei fiktive Brunnen angeordnet werden.

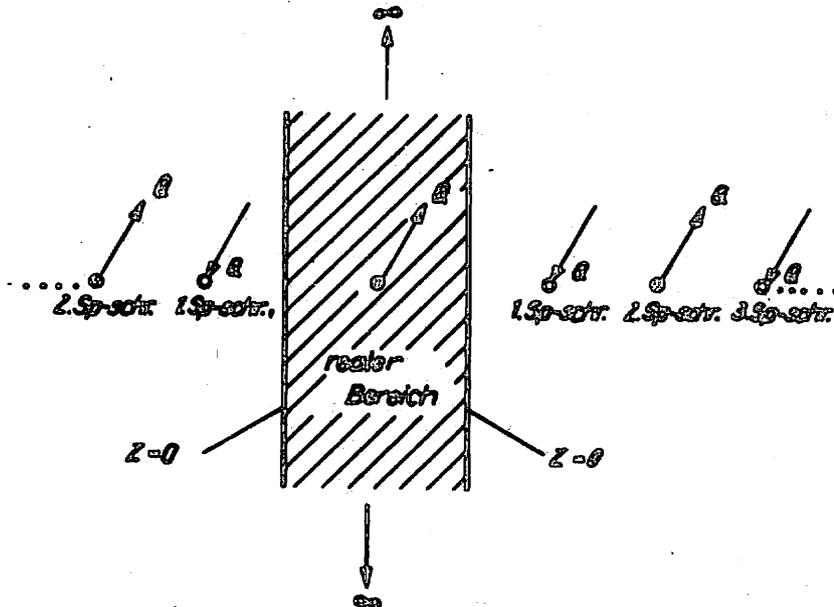


Beim ersten Spiegelungsschritt erhält man die Lage für zwei fiktive Brunnen. Der Brunnen im III. Quadranten ist das Spiegelbild sowohl des Brunnens vom II. als auch vom IV. Quadranten (2. Spiegelungsschritt).

Die sich unter diesen Verhältnissen ergebenden Gleichungen wurden im WAPRO 1.42. zusammengestellt.

Befinden sich die Brunnen in einem zweiseitig-parallel begrenzten unendlich ausgedehnten Grundwasserleiter, so ergeben sich unendlich viele fiktive Spiegelbrunnen.

Eine unendliche Brunnenzahl läßt sich natürlich praktisch nicht berücksichtigen. Für relativ kleine Werte von  $t$  kann man sich auf den realen Brunnen und die zwei sich im ersten Spiegelungsschritt ergebenden Brunnen beschränken. Die Fehler sind dabei in der Nähe des realen Brunnens kleiner als in größerer Entfernung, weil dann zwischen den Werten  $r^2$ ,  $r_1^2$ ,  $r_2^2$  und den  $r^2$ -Werten der folgenden fiktiven Brunnen nicht mehr die großen Unterschiede auftreten.



Ausführlich wird das Spiegelungsprinzip in / 6 / auch für einige weitere Fälle erläutert.

- 1.4. Spezielle Lösungsmethoden
  - 1.4.1. Konforme Abbildungen
    - 1.4.1.1. Transformationseigenschaften

Wie die vorhergehenden Untersuchungen gezeigt haben, liegt die Hauptschwierigkeit bei der Lösung der grundlegenden Differentialgleichung (3) in der Erfüllung von im Endlichen gelegenen Randbedingungen. Das Spiegelungsprinzip führt nur bei geometrisch einfacher Form des Untersuchungsbereiches zu praktikablen Berechnungsgleichungen. Es versagt, wenn im Verlauf der wiederholten Spiegelungen an den Randgeraden auch fiktive Schluck- oder Entnahmebrunnen im realen Untersuchungsbereich auftreten.

Deshalb verdienen Koordinatentransformationen Interesse, mit deren Hilfe einerseits der ursprüngliche Untersuchungsbereich auf eine einfachere Form zurückgeführt werden kann, während andererseits die Differentialgleichung (3) möglichst wenig geändert wird. Diesen Anforderungen entsprechen die konformen Abbildungen.

Eine Koordinatentransformation  $x' = x'(x,y)$ ,  $y' = y'(x,y)$  vermittelt eine konforme Abbildung, wenn die komplexe Größe  $z' = x' + iy'$  eine analytische Funktion der komplexen Variablen  $z = x + iy$  ist:

$$z' = f(z)$$

In den neuen Koordinaten  $x'$ ,  $y'$  nimmt die Differentialgleichung (3) folgendes Aussehen an / 7/:

$$\left| \frac{df}{dz} \right|^2 \left( \frac{\partial^2 z}{\partial x'^2} + \frac{\partial^2 z}{\partial y'^2} \right) - \frac{z}{B^2} = \left( \frac{z}{B^2} \right) \frac{\partial^2 z}{\partial t^2} \quad (15)$$

Besonders geeignet ist dieses Verfahren für die Untersuchung stationärer Grundwasserströmungen in Grundwasserleitern mit dichter Sohle bzw. Deckschicht ( $Z/B^2 = 0$ ). Die Differentialgleichung (3) geht dann einfach in die Potentialgleichung

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} = 0 \quad \text{bzw.} \quad \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x'^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y'^2} = 0 \quad (15'')$$

$$\text{mit } \varphi = 4 \pi k Z/Q \quad (\text{s. Gl. 5a})$$

über. Aus Gl. (15) ist ersichtlich, daß diese spezielle Form der Differentialgleichung beim Übergang zu den neuen Koordinaten  $x'$ ,  $y'$  erhalten bleibt.

#### 1.4.1.2. Berechnung von Einzelbrunnen.

Gelingt es, durch eine passend gewählte Abbildungsfunktion  $f(z)$  den Untersuchungsbereich so auf den Einheitskreis  $r_k' = 1$  abzubilden, daß der ursprünglich im Punkt  $(x_0, y_0)$  angeordnete Brunnen im Koordinatenursprung ( $x' = y' = 0$ ) zu liegen kommt, so lautet die Lösung des stationären Strömungsproblems in Analogie zu der bekannten Brunnengleichung von DUPUIT (Randbedingung  $\varphi = 0$  vorausgesetzt)

$$\varphi = \ln(1/r'^2) = 2 \ln\left(\frac{1}{r'}\right) \quad (16)$$

$$\text{mit } r'^2 = x'^2 + y'^2.$$

Zur Ableitung der Beziehung zwischen der Brunnenabsenkung und der Förderleistung ist in Gl. (16) für  $r'$  der transformierte Brunnenradius  $r_0'$  einzusetzen, der sich aus der Beziehung

$$r_0' = r_0 \left| \frac{df}{dz}(x_0 + iy_0) \right| \quad (17)$$

errechnet.

Ist die Abbildung  $f(z)$  das Ergebnis mehrerer Transformationsschritte, so ist die in (17) auftretende Ableitung nach der Kettenregel gleich dem Produkt der Einzelableitungen.

Konforme Abbildungen sind auch dazu geeignet, für die nähere Umgebung des betrachteten Brunnens Näherungsformeln für den nichtstationären Übergangsbereich herzuleiten. Dazu verhilft folgende Überlegung:

Aus der Gleichung (16) mit  $r' = r_0'$  ist abzulesen, daß im stationären Endzustand die gleiche Brunnenabsenkung zustande kommen würde, wenn das Untersuchungsgebiet durch einen Kreis vom Radius

$$r_k' = r_0/r_0' = \frac{1}{\left| \frac{df}{dz}(x_0 + iy_0) \right|} \quad (18)$$

ersetzt würde. Ebenso eignet sich als "geohydraulisch äquivalentes" Gebiet eine Halbebene, deren Randgerade vom Brunnen den Abstand  $r_k'/2$  hat. Für beide Fälle läßt sich der nichtstationäre Absenkungsvorgang analytisch erfassen (s. Abschnitte 1.3.2.2. und 1.4.2.).

Wird nun die konforme Abbildung, die den ursprünglichen Untersuchungsbereich auf Kreis oder Halbebene abbildet, so normiert, daß

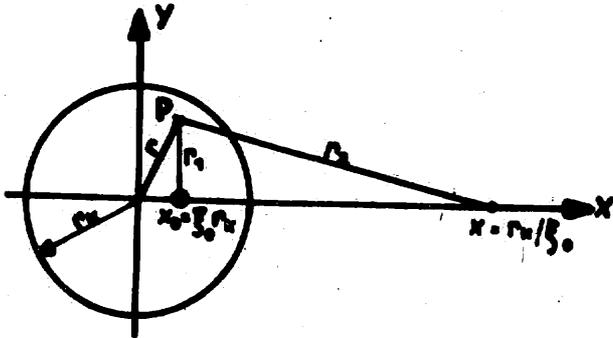
$$\left| \frac{df}{dz}(x_0 + iy_0) \right| = 1$$

so gilt nicht nur  $r_0' = r_0$ , sondern für die nähere Umgebung des Brunnens auch  $x' \approx x$ ,  $y' \approx y$ . Innerhalb dieser Nahzone, die bei der konformen Abbildung praktisch nicht verzerrt wird, bleibt also die Differentialgleichung (3) auch in den neuen Koordinaten unverändert gültig. Damit liefert die transformierte Randwertaufgabe für diesen Bereich eine Approximation der exakten Lösung.

1.4.1.3. Anwendungsbeispiele

Für die Grundwasserhydraulik ist die Methode der konformen Abbildungen in folgenden Fällen von besonderem Interesse:

a) Kreisgebiet, Brunnen in exzentrischer Lage



Die konforme Abbildung, die den Kreis so auf sich abbildet, daß der Punkt  $(x_0, 0)$  in den Koordinatensprung übergeht, lautet

$$z' = f(z) = \frac{z - x_0}{r_k - z \xi_0} \quad (19)$$

$$\frac{dz'}{dz} = \frac{r_k (1 - \xi_0^2)}{(r_k - z \xi_0)^2}$$

Für die Aufstellung der Ergiebigkeitsformel interessiert der Wert der Ableitung für  $z = x_0$ :

$$\frac{dz'}{dz}(x_0) = \frac{1}{r_k (1 - \xi_0^2)}$$

Das "geohydraulische Äquivalent" des betrachteten Brunnens ist also ein Brunnen, der im Zentrum eines Kreises vom Radius  $r_k' = r_k (1 - \xi_0^2)$  liegt. (s. Gl. 18).

Zur vollständigen Berechnung des Potentialfeldes wird die Größe

$$z' \bar{z}' = z' \bar{z}' \quad (\bar{z}' = \text{konjugiert komplexe Zahl zu } z')$$

benötigt. Sie ergibt sich aus (19) zu

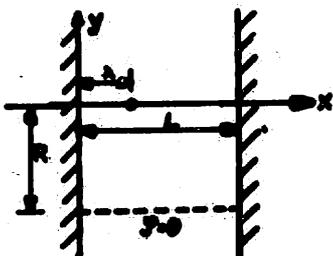
$$z' \bar{z}' = \frac{(z - x_0)(\bar{z} - x_0)}{(r_k - z \xi_0)(r_k - \bar{z} \xi_0)} = \frac{|z - x_0|^2}{\xi_0^2 |z - r_k/\xi_0|^2} = \frac{r_1^2}{\xi_0^2 r_2^2}$$

Wird dieser Ausdruck in (16) eingesetzt, so erhält man die bekannte Formel (DE WIEST, 1965),

$$y = 2 \ln(\xi_0 r_2 / r_1) = 2 \ln \frac{x_0 r_2}{r_k r_1}$$

die auch mit Hilfe des Spiegelungsverfahrens abgeleitet werden kann.

b) Zweiseitig parallel begrenzter Grundwasserleiter



Die Gleichungen werden am übersichtlichsten, wenn das nebenstehende Koordinatensystem verwendet wird.

Bei diesem Typ von Randbedingungen bildet die konforme Abbildung des Untersuchungsgebietes auf den Einheitskreis eine mögliche, aber unzuweckmäßige Art der Lösung. Günstiger ist es, den Streifen auf die Vollebene abzubilden, was mit Hilfe der komplexen Sinusfunktion gelingt.

Zunächst der einfachste Fall:  $\lambda = L/2$

$$z' = \sin \pi(z - \lambda) / L \quad (21)$$

bildet den Parallelstreifen  $0 \leq z \leq L$  auf die volle  $z'$ -Ebene ab. Die Funktion

$$\mathcal{P} = \ln \frac{1}{|z'|^2} + C \quad (22)$$

beschreibt daher das Potential einer punktförmigen Senke im Punkt  $(\lambda, 0)$ . Durch Anwendung des Spiegelungsprinzips läßt sich die spezielle Potentialfunktion zur Erfüllung verschiedener Randbedingungen benutzen.

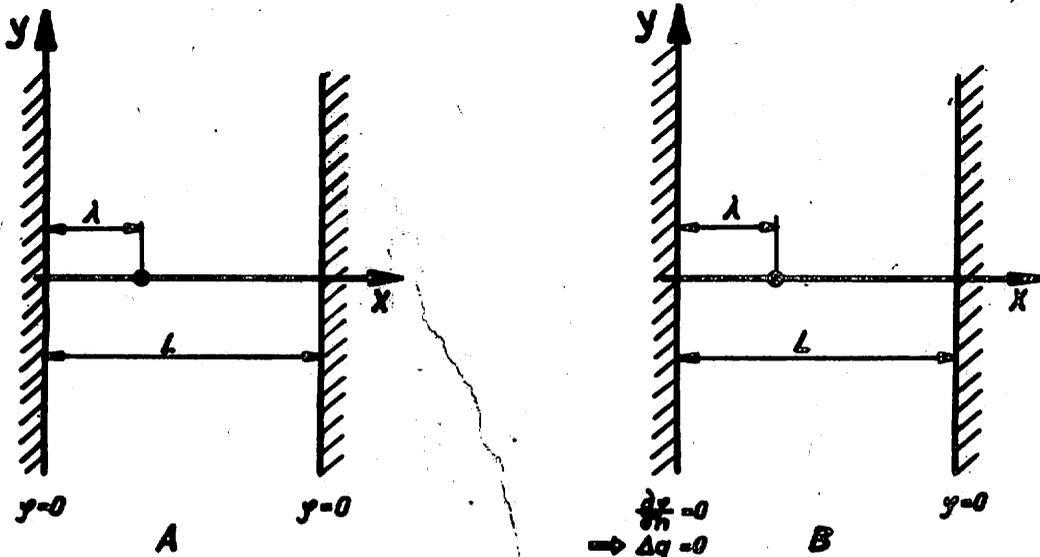
Zunächst ist ersichtlich, daß die Randgeraden  $x = 0$  und  $x = L$  Symmetrieachsen der Abbildung (21) und somit Stromlinien des durch (22) beschriebenen Strömungsfeldes sind. Eine im Abstand  $R$  befindliche Speisekontur (Randbedingung  $\mathcal{P} = 0$ ) läßt sich einfach durch Anordnung eines spiegelbildlichen Schluckbrunnens berücksichtigen. Damit ergibt sich als spezifische Potentialdifferenz für diese von MUSKAT untersuchte Aufgabenstellung / 9 /.

$$\mathcal{P} = \ln \left| \frac{\sin \left[ \frac{\pi}{L} (z + 2iR - L/2) \right]}{\sin \left[ \frac{\pi}{L} (z - L/2) \right]} \right|^2$$

Die Lösung des Typs C im WAPRO 1.42. Blatt 2 Abschnitt 4.5. basiert auf dieser Gleichung. Wegen der Symmetrie des Strömungsfeldes ist es für die praktische Anwendung bequemer, den Koordinatensprung in den Brunnen zu legen. Wesentlich einfacher gestaltet sich die Formel außerdem durch Verwendung der Identität

$$\begin{aligned} |\sin(a + bi)|^2 &= |\sin a \cos bi + \cos a \sin bi|^2 \\ &= |\sin a \operatorname{ch} b - i \cos a \operatorname{sh} b|^2 \\ &= \sin^2 a \operatorname{ch}^2 b + \cos^2 a \operatorname{sh}^2 b \\ &= \operatorname{ch}^2 b - \cos^2 a = \frac{1}{2} (\operatorname{ch} 2b - \cos 2a) \end{aligned}$$

Die Ableitung des Potentials  $\mathcal{P}$  für die beiden anderen im WAPRO 1.42. berücksichtigten Fälle (Typ A und Typ B) ist etwas schwieriger.



Fall A: Die Randbedingung  $\varphi = 0$  auf der Geraden  $x = 0$  wird durch spiegelbildliche Anordnung eines fiktiven Schluckbrunnens im Punkt  $(-\lambda, 0)$  erfüllt. Der Untersuchungsbereich wird durch diese Spiegelung auf den Streifen  $-L \leftarrow x \rightarrow L$  ausgedehnt. An die Stelle der Abbildung (21) tritt deshalb

$$z_1' = \sin \frac{\pi(z-\lambda)}{2L}$$

Die Potentialfunktion (22) mit dem so definierten  $z'$  erfüllt allerdings nicht die Randbedingung bei  $x = \pm L$ . Dazu verhilft das Potential der fiktiven Quelle, das mit Hilfe von

$$z_2' = \sin \frac{\pi(z+\lambda)}{2L}$$

berechnet wird. Für  $z = L + iy$  gilt offenbar  $z_1' = z_2'$  und somit löst

$$\varphi = \ln \left| \frac{z_2'}{z_1'} \right|^2$$

die gestellte Aufgabe.

Fall B: Dieser Fall lässt sich auf den vorhergehenden zurückführen, indem der gesamte Untersuchungsbereich an der  $y$ -Achse gespiegelt wird. In dem so entstehenden Streifen der Breite  $2L$  ist nun das Potential für 2 Entnahmekbrunnen bei  $z = \pm \lambda$  zu berechnen.

Zur Einschätzung des zeitlichen Vorlaufes, der notwendig ist, damit mit diesen für den stationären Endzustand abzuleitenden Formeln gerechnet werden kann, können die nach dem Separationsverfahren (siehe Abschnitt 1.4.2.) gewonnenen Lösungen für Rechteckbereiche (Fall A und B) oder das Spiegelungsverfahren (B) herangezogen werden. Die gewonnenen Abschätzungen beziehen sich allerdings stets auf die nähere Umgebung des Brunnens; für den gesamten unendlichen Untersuchungsbereich lassen sich reale Abschätzungen nur schwer durchführen.

c) Gebiete, die durch Sinusspiralen begrenzt sind

Eine Klasse von Randkurven, bei denen die konforme Abbildung auf den Einheitskreis relativ einfach realisiert werden kann, bilden die Sinusspiralen / 8 /. In Polarkoordinaten  $r, \alpha$  werden diese Kurven durch die allgemeine Gleichung

$$r^n = \frac{(2A)^n}{2} \cos n\alpha \quad \left(-\frac{\pi}{2|n|} \leq \alpha \leq \frac{\pi}{2|n|}\right) \quad (23)$$

beschrieben. Darin ist  $A$  eine positive Konstante und  $n$  eine reelle Zahl mit  $|n| \geq 1/2$ . Als bekannte Spezialfälle seien Kardioiden ( $n = 1/2$ ), Parabel ( $n = -1/2$ ), Kreis ( $n = 1$ ), Gerade ( $n = -1$ ), Lemniskate ( $n = 2$ ) und gleichseitige Hyperbel ( $n = -2$ ) angeführt.

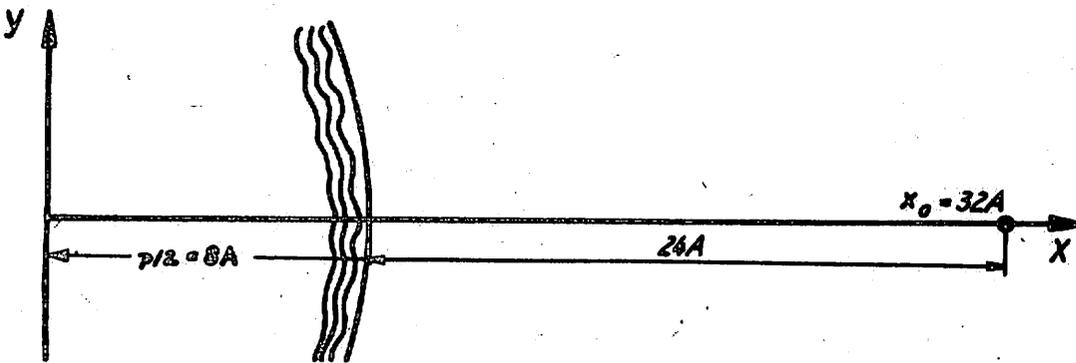
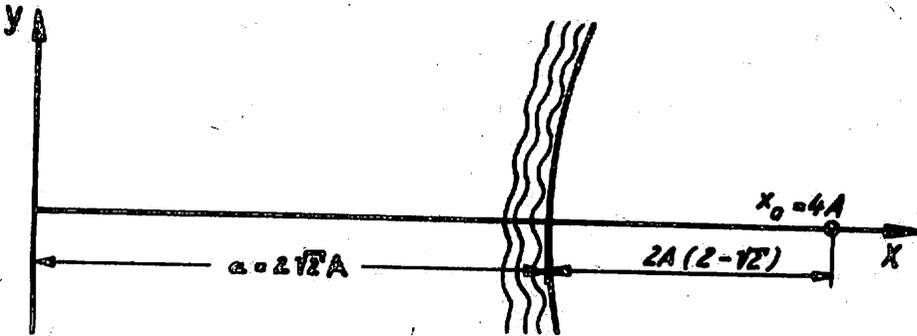
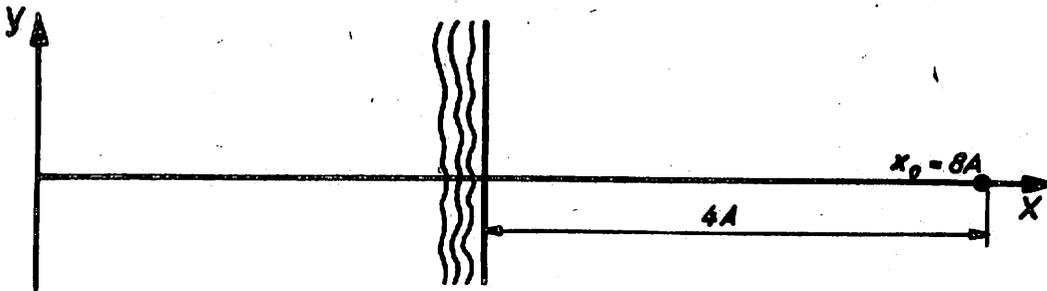
Durch die konforme Abbildung

$$f(z) = \frac{z^{2-n}}{A^n} \cdot z^n - 1 \quad (24)$$

werden die durch Gl. (23) definierten Kurven umkehrbar eindeutig auf den Kreis  $|z'| = 1$  abgebildet. Dabei geht der Punkt auf der reellen Achse

$$x_0 = \frac{2A}{2^{2/n}} \quad (25)$$

in den Nullpunkt der  $z'$ -Ebene über.



Für die Grundwasserhydraulik von besonderem Interesse sind die Fälle  $n = -1/2$  (Parabel) und  $n = -2$  (gleichseitige Hyperbel), durch die sich die Form von Flußkrümmungen berücksichtigen läßt. Die geometrische Interpretation der Konstanten  $A$  ergibt sich dabei aus Gl. (23) in folgender Weise:

$$n = -1/2 \quad \sqrt{r} = \frac{2\sqrt{2}A}{\cos(\alpha/2)}$$

$$r = \frac{8A}{\cos^2(\alpha/2)} = \frac{16A}{1 + \cos\alpha}$$

$$y^2 = r^2 \sin^2\alpha = (16A)^2 \frac{1 - \cos^2\alpha}{(1 + \cos\alpha)^2} = (16A)^2 \frac{1 - \cos\alpha}{1 + \cos\alpha}$$

$$= (16A)^2 \left[ 1 - 2 \frac{\cos\alpha}{1 + \cos\alpha} \right] = (16A)^2 \left[ 1 - \frac{2r \cos\alpha}{16A} \right]$$

$$y^2 = -2 \cdot 16A (x - 8A) = -2p (x - p/2)$$

mit  $p = 16A$

$$\underline{h = -2} \quad r^2 = \frac{8A^2}{\cos 2\alpha}$$

$$x^2 - y^2 = r^2(\cos^2 \alpha - \sin^2 \alpha) = \frac{8A^2}{\cos 2\alpha} \cos 2\alpha = 8A^2$$

Mit  $a = 2 \sqrt{2}A$  ist dies die übliche Gleichung der gleichseitigen Hyperbel:

$$x^2 - y^2 = a^2$$

Für diese beiden Arten von Randbedingungen sind die Berechnungsgleichungen, die sich nach dem unter Abschnitt 1.4.1.2. erläuterten Verfahren ableiten lassen, im WAPRO 1.42. aufgeführt. Um die Formeln übersichtlicher zu gestalten, wurden dabei nur Brunnen betrachtet, die auf der reellen Achse der z-Ebene, also auf der Symmetrieachse der Randkurve liegen.

#### 1.4.2. Separationsmethode

Bei hinreichend einfacher Form des Untersuchungsbereiches (Kreis, Rechteck) gibt es ein weiteres Verfahren zur analytischen Lösung der Differentialgleichung (3), das von einem Produktansatz für die Lösung ausgeht und auf Reihenentwicklungen nach Orthogonalfunktionen hinausläuft / 7 /. Es soll hier am Beispiel der rotationssymmetrischen Brunnenanströmung im Kreisgebiet (Gl. 6) erläutert werden.

Die grundlegende Differentialgleichung Gl. (6) nimmt bei rotationssymmetrischer Grundwasserströmung ohne Speisung aus liegenden oder hangenden Schichten folgende Form an:

$$\frac{\partial^2 f}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial f}{\partial r} = \frac{S}{M} \frac{\partial f}{\partial t} \quad (26)$$

An Nebenbedingungen sind zu erfüllen:

$$f(r,0) = 0, \quad \lim_{r \rightarrow 0} r \frac{\partial f}{\partial r} = -2$$

$$a) \quad f(r_k, t) = 0 \quad \text{oder} \quad b) \quad \frac{\partial f}{\partial r}(r_k, t) = 0 \quad (27)$$

Die Singularität im Nullpunkt wird am einfachsten behoben, indem  $f$  in zwei Summanden zerlegt wird:

$$f = f_1 + f_2,$$

worin  $f_2$  den asymptotischen Verlauf der Absenkung nach sehr langer Zeit beschreibt. Bei der Randbedingung a) entspricht dieser Anteil einfach dem stationären Endzustand:

$$f_2 = 2 \ln(r_k/r)$$

Im Falle der Randbedingung b) stellt sich nach genügend langer Zeit im gesamten Kreisgebiet eine gleichmäßige Absenkungsgeschwindigkeit ein, die durch

$$f_2 = 2 \ln(r_k/r) + (r/r_k)^2 + \frac{4M}{Sr_k^2} t$$

charakterisiert werden kann.

Für die Funktion  $f_1$  gilt ebenfalls die Randbedingung a) oder b), sie besitzt aber keine Singularität im Nullpunkt und erfüllt die Anfangsbedingung

$$\varphi_1(r, 0) = -\varphi_2(r, 0) \quad (28)$$

Zur Bestimmung von  $\varphi_1$  verhilft der Produktansatz

$$\varphi_1 = u(r) \cdot v(t)$$

Einsetzen in (26) liefert

$$\frac{1}{u} \left[ \frac{d^2 u}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{du}{dr} \right] = \frac{S}{T} \frac{1}{v} \frac{dv}{dt}$$

Auf der rechten Seite dieser Gleichung steht ein Ausdruck, der nur von  $t$  abhängt, während die linke Seite eine reine Funktion von  $r$  ist. Die Gleichung kann daher nur gelten, wenn beide Seiten konstant sind:

$$\frac{S}{T} \frac{dv}{dt} + \mu^2 v = 0 \quad (29)$$

$$\frac{d^2 u}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{du}{dr} + \mu^2 u = 0 \quad (30)$$

Aus (29) resultiert

$$v = C \exp(-\mu^2 Tt/S) \quad (31)$$

Das Vorzeichen der Konstanten wurde so gewählt, daß die Lösung einem stabilen Endwert ( $\varphi = 0$ ) zustrebt.

Die gewöhnliche Differentialgleichung (30) wird unter den gegebenen homogenen Randbedingungen stets durch die triviale Lösung  $u = 0$  erfüllt. Von Interesse sind natürlich nur die Werte von  $\mu$  (Eigenwerte), die eine nichttriviale Lösung (Eigenfunktion) liefern.

Die gesuchten Eigenfunktionen lauten

$$u_n = J_0(\mu_n \cdot r),$$

wobei die  $\mu_n$  durch folgende Bedingungen definiert sind:

$$\text{Randbedingung a) } J_0(\mu_n \cdot r_k) = 0$$

$$\text{Randbedingung b) } J_1(\mu_n \cdot r_k) = 0$$

Für  $\varphi_1$  ergibt sich somit der Reihenansatz:

$$\varphi_1 = \sum_{n=1}^{\infty} A_n J_0(\mu_n \cdot r) \exp(-\mu_n^2 Tt/S) \quad (32)$$

Die Koeffizienten  $A_n$  werden so festgelegt, daß die Anfangsbedingung (28) erfüllt ist. Da die Eigenfunktionen  $u_n$  ein Orthogonalsystem bilden, läuft dies auf eine Reihenentwicklung der Funktion  $\varphi_2(r, 0)$  nach BESSEL-Funktionen hinaus. In weitgehender Analogie zur gewöhnlichen Fourierreiheentwicklung lautet die Bestimmungsgleichung für die Koeffizienten  $A_n$ :

$$A_n = - \frac{\int_0^{r_k} \varphi_2(r, 0) J_0(\mu_n \cdot r) r dr}{\int_0^{r_k} J_0^2(\mu_n \cdot r) r dr} \quad (33)$$

Auf diesem Wege ergeben sich die in WAPRO 1.42. angegebenen Berechnungsgleichungen des Abschnittes 4.6.

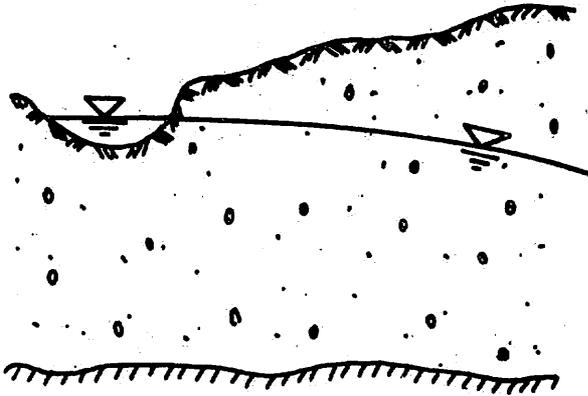
## 1.5. Erfassung natürlicher Berandungen

### 1.5.1. Äußere Berandung

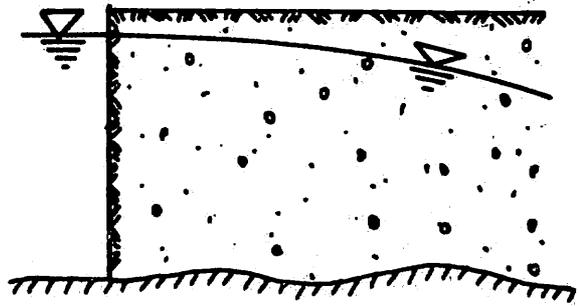
Meist sind die natürlich auftretenden Berandungen nicht so beschaffen, wie sie sich in den vorgenannten Gleichungen berücksichtigen lassen. Im allgemeinen Fall besitzen die äußeren Berandungen im Grundriß eine andere Form, als dies die berechenbaren Schemata ausweisen. Man muß deshalb die tatsächlichen Berandungen zu erfassbaren vereinfachen.

Meist wird man das tatsächliche Problem so schematisieren, daß das ausgewählte hydraulische Schema die tatsächlichen Verhältnisse mit größter Wahrscheinlichkeit erfaßt. Darüberhinaus wird man 2 weitere Schemata auswählen, um eine obere und untere Grenze des Verhaltens abschätzen zu können.

häufig sind die äußeren Berandungen unvollkommen, d. h. sie durchdringen den Grundwasserleiter nicht vollständig.



Unvollkommene äußere Berandung  
- real -



vollkommene äußere Berandung  
- idealisiert -

Bei einer unvollkommenen Berandung tritt ein zusätzlicher hydraulischer Widerstand auf.

In der ersten Phase des Brunnenbetriebes fließt noch kein Wasser von der äußeren Randbedingung zum Brunnen, sodaß dieser zusätzliche Widerstand vorerst Null ist. Für große Zeiten strebt er langsam seinem Größtwert (Endwert) zu.

Dieser stationäre Endwert läßt sich durch Analogiemodellversuche bestimmen / 10 /.

Wird nun der stationäre Endzustand untersucht, so läßt sich der hydraulische Widerstand in eine fiktive Zusatzlänge umrechnen. Es wird hier das gleiche Prinzip wie in der Rohrhydraulik angewendet, wo ebenfalls manchmal örtliche Verlustbeiwerte in fiktive zusätzliche Rohrlängen umgerechnet werden.

Diese Zusatzlängen  $\Delta L_1$  werden im WAPRO 1.42. als Funktion der Mächtigkeit, der Breite des Vorfluters oder des Beckens und der Form des Ausströmens des Oberflächenwassers in den Untergrund angegeben. Die tatsächliche Berandung muß somit um  $\Delta L_1$  nach außen verrückt werden. Dies ist nur für den stationären Endzustand möglich, da zuvor zum einen  $\Delta L_1$  kleiner ist und zum anderen durch das Verrücken der Kontur sich der Speicherkoeffizient auf einen größeren Bereich beziehen würde, d. h. es würde in die Rechnung die Ausbildung eines

größeren Absenktrichters Eingang finden, als das tatsächlich möglich ist.

Häufig befindet sich auf der Sohle des Oberflächengewässers außerdem eine Schlammsschicht. Diese Schlammsschicht verursacht einen weiteren, oftmals erheblichen hydraulischen Widerstand. Dieser hydraulische Widerstand läßt sich analytisch mit Hilfe der Gleichungen den "undichten" Grundwasserleiter ermitteln / 10 /. Für den stationären Endzustand läßt sich dieser hydraulische Widerstand wiederum in eine fiktive Zusatzlänge  $\Delta L_2$  umrechnen, die die Kontur nach außen verschoben werden muß.

Für wichtige Verhältnisse wurde diese Mehrlängen  $\Delta L_2$  im WAPRO 1.42. in Abhängigkeit von k-Wertes und der Dicke der Schlammsschicht, des k-Wertes und der Mächtigkeit des betrachteten Grundwasserleiters sowie der Breite des Oberflächengewässers angegeben.

### 1.5.2. Innere Berandung

Die innere Berandung ist der Brunnenmantel. Der Brunnenradius  $r_0$  bezieht sich auf den Durchmesser. Die Verluste, die sich beim Durchströmen der Filterkonstruktion bis zum P ergeben, werden als Verlusthöhe  $\Delta h$  wie folgt erfaßt:

Der Druckverlust  $\Delta h_{F1}$ , der beim Eintritt des Wassers in das Filterrohr und durch die Bewegung innerhalb des Filterrohres hervorgerufen wird, berechnet sich zu / 12 /

$$\Delta h_{F1} = \frac{Q^2}{2g \cdot F_w^2} \cdot 2 \frac{\left[ e \left( \frac{C \cdot L_w}{D_1} \right) \cdot e \right]^2 + 1}{e^2 \left( \frac{C \cdot L_w}{D_1} \right) + e^2} \quad [m] \quad (34)$$

Dabei bedeuten:

- $\Delta h_{F1}$  [m] - Wasserspiegeldifferenz zwischen Außenwandung des Filterrohres und dem Brunnenwasserspiegel
- $Q$  [m<sup>3</sup>/s] - Fördermenge
- $F_w$  [m<sup>2</sup>] - Wirksame Filterfläche:  
 $F_w = \frac{\pi \cdot D_1^2}{4} - \sum F$  aller Einbauten
- $g$  [m/s<sup>2</sup>] - Erdbeschleunigung
- $C = \eta \cdot C_B$
- $\eta = \frac{\sum f_1}{F_1}$  (dimensionslos) - freie Durchlaßfläche des Filters (der entsprechenden TGL zu entnehmen)
- $C_B$  - Kontraktionskoeffizient der Filteröffnungen (versuchstechnisch zu bestimmen)
- $L_w$  [m] - gelochte Filterlänge
- $D_1$  [m] - Innendurchmesser des Filterrohres

Die Werte  $C_B$  sind für die einzelnen Filtertypen verschieden und außer von der Form der Öffnung der Filteröffnungen im gewissen Maße auch von dem vor den Filteröffnungen liegenden Korn des Filterkieses abhängig.

Näherungsweise gilt für

|   |                  |
|---|------------------|
| Steinzeugfilter                                 | $C_B \approx 12$ |
| Langlochschlitzfilter und<br>Stahlbrückenfilter | $C_B \approx 15$ |
| Einkornfilter                                   | $C_B \approx 25$ |
| Misc- und Hilu-Filter                           | $C_B \approx 30$ |

Wird  $\frac{C \cdot L_W}{D_1} \geq 6$ , so erreicht der Filterwiderstand  $\Delta h_{F1}$  ein Minimum. Er ist dann unabhängig von der Korngröße des vor den Eintrittsöffnungen liegenden Filterkieses, und die Wahl der Korngröße des Filterkieses kann dann ausschließlich so erfolgen, daß eine Versandung verhindert wird.

Für praktische Fälle wird  $\frac{C \cdot L_W}{D_1} \geq 6$  fast immer erreicht bzw. leicht durch Variation von  $L_W/D_1$  erreichbar sein.

Bereits ab  $\frac{C \cdot L_W}{D_1} \geq 3$  vereinfacht sich die Berechnungsformel für den Druckhöhenverlust zu / 12 /:

$$\Delta h_{F1} = \frac{2,4}{8} \cdot \frac{C^2}{F_W^2} = 0,755 \cdot \frac{C^2}{F_W^2} \quad [m] \quad (35)$$

Der Fehler für  $\Delta h_{F1}$  gegenüber der genauen Berechnung beträgt dann  $\epsilon < 2\%$ . Die Gl. (35) fand Eingang in den WAFRO 1.42.

Ein weiterer Verlust an Druckhöhe wird durch den hydraulischen Widerstand des Filterkieses hervorgerufen. Dieser Widerstand wird außer durch die geförderte Wassermenge hauptsächlich durch Parameter der Filterkieseschüttung bestimmt. Maßgeblich dabei sind sowohl geometrische Abmessungen der Schüttung als auch bodenphysikalische Kennwerte. Sieht man davon ab, daß gegenwärtig noch keine quantitativen Aussagen über den Einfluß von Porenvolumen und Lagerungsdichte auf den Filterwiderstand gemacht werden können, so ist der auftretende Druckverlust bestimmbar / 13 /:

$$\Delta h_{K1} = \frac{v_1^2}{2g} \cdot \xi \cdot \frac{(r_B - r_1)}{D_{50}} \quad [m] \quad (36)$$

Für Filtergewebe ist in Gl. (36) für

$$\frac{r_B - r_1}{D_{50}} = 4 n \frac{d}{W}$$

einzusetzen.

Dabei bedeuten:

|                 |       |  |
|-----------------|-------|--|
| $\Delta h_{K1}$ | [m]   | - Wasserspiegeldifferenz zwischen äußerer und innerer Begrenzung des Kiesfilters |
| $v_1$           | [m/s] | - Filtergeschwindigkeit an der Innenseite des Filtermantels (bei $r = r_1$ )     |
| $r_B, r_1$      | [m]   | - äußerer bzw. innerer Radius des Kiesmantels                                    |
| $D_{50}$        | [m]   | - Korndurchmesser des Filtermaterials bei 50 % der Kornverteilungskurve          |

- $\xi$  - Widerstandsbeiwert nach Bild 1/1  
 $R_e = \frac{v_i \cdot D_{50}}{\nu}$  - Reynoldszahl  
 $\nu$  [m<sup>2</sup>/s] - Kinematische Zähigkeit des Wassers  
 $n$  [ / ] - Anzahl der Gewebelagen  
 $w$  [ mm ] - Maschenweite des Gewebes  
 $d$  [ mm ] - Gewebedicke

Die Gl. (36) fand Eingang in den WAPRO 1.42.

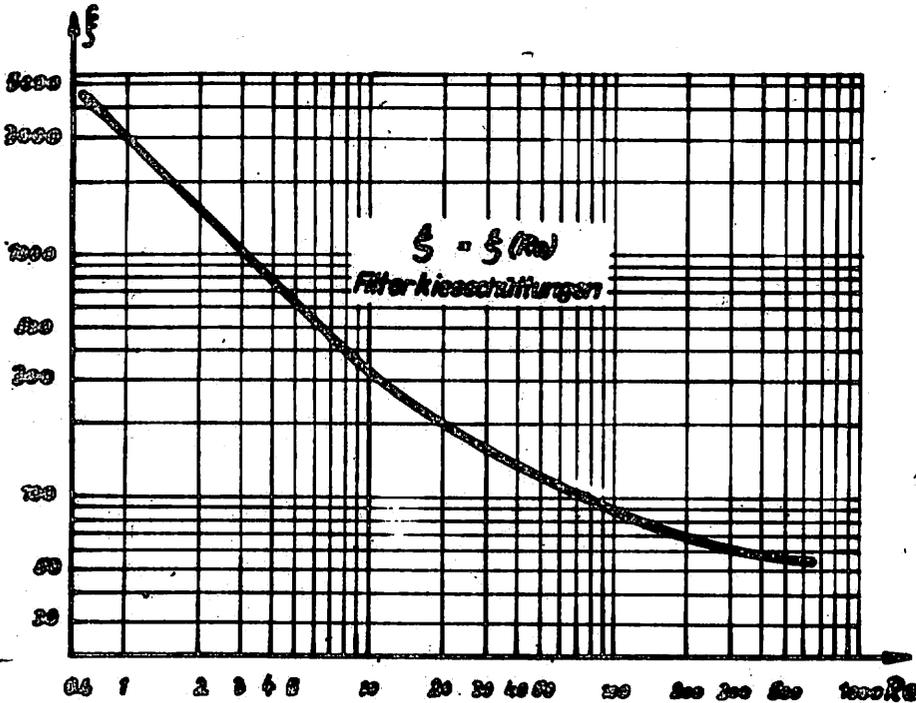


Bild 1/1 nach / 13 /

Der Wasserspiegel im Filterrohr des Brunnens liegt somit um  $\Delta h = \Delta h_{F1} + \Delta h_{K1}$  niedriger als an der Bohrlochwandung. Alle Berechnungen des Wasserstandes im Grundwasserleiter gehen von

$$h(r_0) = h_{\text{Brunnen}} + \Delta h_{F1} + \Delta h_{K1} \quad (37)$$

aus. Die Strömung in der Filterkonstruktion wird somit nicht als Grundwasserströmung betrachtet. Die Größe  $\Delta h$  ist zeitlich konstant, da sofort nach dem Einsetzen der Förderung die Filterkonstruktion von der vollen Fördermenge durchströmt wird.

Häufig sind die Brunnen unvollkommen oder unvollkommen ausgebaut. Hierdurch werden wiederum zusätzliche hydraulische Widerstände bzw. Potentialdifferenzen verursacht, da sich die Strombahnen verlängern und die Querschnitte der Stromröhren gegenüber der Anströmung vollkommener Brunnen verringern. Bis sich die endgültigen stationären Verhältnisse eingestellt haben, vergeht eine gewisse Zeit. Diese Zeitspanne steht aber für Versorgungsbrunnen nicht - wie beispielsweise bei Pumpversuchen - im Mittelpunkt des Interesses. Im Werkstandard WAPRO 1.42. wurden deshalb nur die hydraulischen Widerstände aufgenommen, die sich nach dieser relativ kurzen ersten Phase ergeben.

Die Berechnung eines unvollkommenen Brunnens erfolgt dadurch, daß man längs der Brunnenachse im ausgebauten Bereich punktförmige Senken stetig verteilt anordnet / 8 /. Die Randbedingungen an den undurchlässigen oberen und unteren Begrenzungen des Grundwasserleiters lassen sich dabei nach dem Spiegelungsprinzip berücksichtigen. Die Randbedingungen am Brunnenmantel können allerdings nur in mehr oder minder guter Näherung erfüllt werden. Nimmt man an, daß die Intensität jedes Quellabschnittes gleich groß ist ( $q = q(z) = Q/l = \text{const.}$ ), so ergibt sich, daß die Schnittlinien der Potentialflächen mit der rz-Ebene konfokale Ellipsen darstellen. In der Nähe der linienförmigen Senke werden diese Ellipsen sehr schmal und können als Approximation für die rechteckförmige Schnittfigur des Brunnenmantels mit der rz-Ebene benutzt werden. Es gilt nun eine Ellipse auszuwählen, die den Brunnenmantel repräsentiert. Muskat hat anhand von Beispielsuntersuchungen festgestellt, daß die Ellipse, die durch den Punkt  $(r_0, 0,75 l)$  verläuft, eine sehr gute Approximation liefert. Die Anwendbarkeit dieser Beziehung wurde von Franke experimentell überprüft.

Die aufgezeigte Methode läßt sich auch zur Ableitung der Beziehungen für unvollkommen ausgebauten Brunnen nutzen.

Ergebnis dieser Berechnungen ist die Brunnenergiebigkeit, aus der sich die spezifische Potentialdifferenz ableiten läßt. Im WAPRO 1,42. wurde die Differenz der spezifischen Potentialdifferenz des unvollkommenen Brunnens minus der spezifischen Potentialdifferenz des vollkommenen Brunnens in Abhängigkeit der geometrischen Parameter tabellarisch erfaßt. Bei allen Berechnungen ist diese zusätzliche spezifische Potentialdifferenz infolge der Unvollkommenheit der inneren Berandung zu der Potentialdifferenz, die sich bei Berücksichtigung vollkommener Brunnen ergibt, zu addieren (s. a. / 14 /).

#### 1.6. Brunnengalerien mit Heberleitung

Während sich bei Einzelpumperbestückung der betriebenen Brunnen ihre gegenseitige Beeinflussung nur auf das Grundwasserströmungsfeld erstreckt, tritt beim Heberbetrieb eine zusätzliche gegenseitige Beeinflussung der Absenkungen in den Brunnen und damit der einzelnen Förderleistungen über die gemeinsame Heberleitung ein. Eine Berechnungsmethode muß deshalb diese zweifache Interferenz erfassen.

Die gegenseitige Beeinflussung der Brunnen über den gemeinsamen Grundwasserleiter wird durch nachfolgende Gleichungen erfaßt:

##### 1. ungespannte Verhältnisse (s. Gl. 5b)

$$h_1 = \sqrt{h_n^2 - 2 Z(t)_1} \quad (38)$$

und unter Berücksichtigung der Gl. (12)

$$h_1 = \sqrt{h_n^2 - \frac{1}{2\pi k} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (Q_{i,j} - Q_{i,j-1}) \mathcal{J}(r_1, t - t_{j-1})} \quad (39)$$

$h_1$  - Wasserstand im 1-ten Brunnen

##### 2. gespannte Verhältnisse (s. Gl. 5b)

$$h_1 = h_n - \frac{Z(t)_1}{M} \quad (40)$$

und unter Berücksichtigung der Gl. (12)

$$h_1 = h_n - \frac{1}{4\pi kM} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (Q_{i,j} - Q_{i,j-1}) \mathcal{J}(r_1, t - t_{j-1}) \quad (41)$$

Ausgehend vom Wasserstand in Sammelschacht  $h_0$  läßt sich der Wasserspiegel im  $l$ -ten Brunnen auch wie folgt bestimmen (Berücksichtigung der gegenseitigen Beeinflussung der Brunnen über die gemeinsame Heberleitung):

$$h_1 = h_0 + \sum h_v = h_0 + \sum \left[ \left( \lambda \cdot \frac{l}{D} + \sum \xi^* \right) \frac{Q^2}{8\pi^2 D^4 g} \right] \quad (42)$$

$\lambda \cdot \frac{l}{D}$  und  $\xi^*$  - Verlustbeiwerte der Rohrhydraulik

Der Wasserstand  $h_1$  läßt sich nun durch Gleichsetzen beider Gleichungen eliminieren. Es entsteht ein System von  $n$  nichtlinearen Gleichungen, aus dem die  $n$  unbekanntes Förderungen bestimmt werden können. Die Auswertung des Gleichungssystems erfolgt zweckmäßigerweise mit Hilfe eines Digitalrechners.

Die Berechnung heberbewirtschafteter Brunnen wird in / 11 / ausführlich erläutert.

Die sich ergebenden Gleichungssysteme lassen sich für praktische Fälle nur mit Hilfe von Digitalrechnern lösen. In / 11 / werden einige geprüfte Programme angegeben.

Literaturverzeichnis 1

- / 1 /            Lehrbriefe "Geohydrologie" 1. und 2. Lbf. der TU Dresden
- / 2 /            BUSCH, K.-F. und L. LUCKNER  
Grundgesetze der modernen Grundwasserhydraulik  
Bergbautechnik, 1967, H. 7
- / 3 /            BUSCH, K.-F.; K. TIEMER und L. LUCKNER  
Die wichtigsten Lösungsmethoden für die partiellen Differentialgleichungen  
der Grundwasserhydraulik  
Bergbautechnik, 1967, H. 12
- / 4 /            BUSCH, K.-F. und L. LUCKNER  
Beitrag zur angewandten Brunnenhydraulik  
Bergbautechnik, 1968, H. 1
- / 5 /            BUSCH, K.-F.; L. LUCKNER und K. TIEMER  
Die wichtigsten analytischen Berechnungsverfahren der stationären eindimen-  
sionalen Grundwasserströmungsvorgänge  
Bergbautechnik, 1967, H. 7
- / 6 /            FERRIS, J. G. u. a.  
Theorie der Grundwasserleiter-Tests  
Übersetzung aus: Geological Survey Water-Supply Paper 1536  
E. Washington 1962
- / 7 /            TIEMER, K.  
Wirkungsgrad der unterirdischen Speicherung  
F-Bericht 3801.01.04, IfW Berlin 1966
- / 8 /            TIEMER, K.  
Bewirtschaftung der Grundwasserleiter  
F-Bericht 3801.01.03, IfW Berlin 1969
- / 9 /            DYCK, S.  
Der Entlastungsbrunnen - ein wirksames Mittel zur Beherrschung der Unter-  
strömung von Staudämmen und Deichen  
WWT 6 (1956) 11, 351 - 358
- / 10 /           LUCKNER, L.; PEUKERT, D. und H. LÖFFLER  
Beitrag zur Berechnung des durch Sickergräben, Brunnenreihen oder Dränlei-  
tungen gewinnbaren Infiltrats aus Oberflächengewässern  
WWT 1969, H. 2
- / 11 /           LUCKNER, L.; EICHHORN, D. und J. BORNITZ  
Berechnung von Brunnengalerien und Heberleitungen  
für WWT 1970 in Vorbereitung
- / 12 /           GEISELER, W.-D.  
Über die Strömungsvorgänge bei Vertikalfilterrohrbrunnen mit einfacher Kies-  
schüttung unter besonderer Berücksichtigung der Leistungssteigerung durch  
Entsanden  
Dissertationsschrift der TU Berlin, Fakultät für Bauingenieurwesen, 1967
- / 13 /           PETERSEN, S.; ROHWER, C. und M. L. ARBITSON  
Einfluß der Brunnenfilter auf die Einströmung in Brunnen  
Deutsche Übersetzung (Becksmann, E. ) in BER (14) 1963, H. 4
- / 14 /           BOČEVER, F. M. und N. N. VERIGIN  
Metodičeskoje posobiže po rasčeta ekspluatacionnyh zapasov podzemnyh vod  
dija vodosnabženija, Moskva 1961

## 2. Konstruktion und Gestaltung von Brunnenfiltern

### 2.1. Grundsätzlicher Aufbau von Vertikalfilterbrunnen

#### 2.1.1. Die Bohrung

Voraussetzung für den Vertikalfilterbrunnenbau sind, abgesehen von den in diesem Rahmen nicht interessierenden Rammburgen, die **B o h r u n g e n** :

Für das Abteufen dieser Bohrungen ist bei qualitätsgerechter Ausführung jedes der im Lockergestein einsetzbaren Bohrverfahren geeignet; allerdings erfordert jede Bohrtechnologie eine spezielle Nachbehandlung. Der technische Aufwand der Nachbehandlung stellt dabei im allgemeinen das Kriterium der Brauchbarkeit des Bohrverfahrens im Brunnenbau dar.

Das **S t a u c h b o h r v e r f a h r e n**, des öfteren auch als Trockenbohrverfahren bezeichnet, ist die am weitesten verbreitete und heute auch noch am häufigsten angewandte Technologie zum Niederbringen von Bohrungen im Lockergestein. Bei diesem Verfahren können die Bohrdurchmesser etwa von 133 bis 2000 mm variiert werden und die Endteufen durchaus 200 m erreichen, so daß damit die bohrtechnischen Voraussetzungen für den größten Teil der Brunnenbohrungen erfüllt sind. Beim Bohrvorgang werden dabei als Bohrwerkzeuge Greifer, Schappen, Kiespumpen, Ventilbohrer u. ä. m. entsprechend den zu bohrenden Erdstoffen eingesetzt. Die Bohrung wird teleskopartig verrohrt, wobei die Rohre während des Bohrvorganges hydraulisch bzw. mechanisch gestaucht oder gedreht werden.

Nach Einbau der Brunnenausbauteile wird die Verrohrung wieder gezogen. Die Bohrlochwand bleibt während des gesamten Bohrvorganges relativ sauber und bedarf bei qualitätsgerechter Ausführung keiner gesonderten Nachbehandlung. Der Bohrfortschritt ist verhältnismäßig gering. Die zur Zeit noch wesentlichsten Vorteile dieser Technologie liegen in der Möglichkeit einer relativ exakten Bodenprobenentnahme, die die unerläßliche Grundlage der Filterbemessung ist, und in der Tatsache, daß eine Nachbehandlung entfällt.

Das **S a u g b o h r v e r f a h r e n** hat in jüngster Zeit für das Niederbringen von Brunnenbohrungen an Bedeutung gewonnen, da der ursprüngliche Nachteil einer unexakten Bodenprobenentnahme gegenwärtig bei entsprechenden technischen Voraussetzungen vermieden werden kann. Der Bohrdurchmesser, der sich hierbei mit fortschreitender Teufe nicht verjüngt, kann gegenüber dem Stauchbohrverfahren noch vergrößert werden.

Für den eigentlichen Bohrvorgang wird ein Spülkopf verwendet, der unter intensiver Wasserzugabe Erdstoffe aufwühlt. Das Bohrgut-Wassergemisch wird durch das Bohrgestänge abgesaugt, wobei das Zusatzwasser zwischen Bohrlochwand und Bohrwerkzeug zum Spülkopf strömt. Bei diesem Verfahren entfällt im Gegensatz zum Stauchbohrverfahren die Verrohrung der Bohrung, da die Standsicherheit des Bohrloches durch die nach außen gerichteten Strömungskräfte gewährleistet wird.

Erfolgt das Niederbringen der Bohrungen mit Klarwasser, das nicht im Kreislauf genutzt wird, behält die Bohrlochwand ihre volle Durchlässigkeit. Wird die Wasserspülung im Kreislauf gefahren, so tritt zwar eine gewisse Kolmation des natürlichen Erdstoffes ein, doch kann diese ohne größeren Aufwand wieder rückgängig gemacht werden. Die auf diese Weise hergestellten Bohrungen eignen sich bei sorgfältiger Ausführung in gleicher Weise wie die Stauchbohrungen für den Bau von Vertikalbrunnen. Größeren technischen Aufwand erfordert allerdings die Bodenprobenentnahme, die aber gerade für eine richtige Filterbemessung unerläßlich ist.

Das **S p ü l b o h r v e r f a h r e n** besitzt für Brunnenbohrungen nur untergeordnete Bedeutung, da die Nachbehandlung der Bohrlochwand entweder technisch nicht möglich ist bzw. bei einer speziellen Gestaltung der Brunnenausbauteile einen relativ großen Aufwand erfordert.

Die Bohrdurchmesser entsprechen bei dieser Technologie denjenigen des Saugbohrverfahrens; die Teufen können jedoch bedeutend gesteigert werden.

Der Bohrvorgang entspricht im wesentlichen ebenfalls dem des Saugbohrverfahrens. Der Unterschied besteht lediglich darin, daß das an der Bohrlochsöhle anfallende Bohrgut nicht in einem Gestänge abgesaugt wird, sondern daß das gelöste Gestein mit dem zurückströmenden Spülstrom zwischen dem Bohrgestänge und der Bohrlochwand aufsteigt. Zwangsläufig erhöht sich unter solchen Voraussetzungen, selbst bei der Verwendung von Klarwasser, die Kolmationsgefahr ganz beträchtlich. Erfolgt die Spülung infolge zu großer Spülwasserverluste als Dickspülung ( $\gamma_{Fl} \approx 1,0$ ), kann die Bohrlochwand infolge der Kolmation praktisch völlig abgedichtet werden. Eine unter diesen Bedingungen niedergebrachte Bohrung erfordert eine sorgfältige Nachbehandlung, die aber nur unter bestimmten Bedingungen möglich ist! Darüber hinaus tritt noch der nicht zu unterschätzende Nachteil einer qualitätsgeminderten Erdstoffprobenentnahme auf.

Beim Bau von Brunnen mit hohen Lebenserwartungen wird dieses Verfahren, obgleich es wie das Saugbohren einen außerordentlich großen Bohrfortschritt garantiert, für das Niederbringen der Bohrungen nur in den seltensten Fällen eingesetzt.

Unmittelbar nach Erreichen der Endteufe einer Bohrung sind im Prinzip die Voraussetzungen für den Brunnenbau erfüllt, da eine eventuelle Nachbehandlung der Bohrlochwand generell erst nach Fertigstellung des Brunnens erfolgt. Der Ausbau der Bohrung zum Brunnen sollte aus Wirtschaftlichkeitsgründen möglichst unmittelbar nach Beendigung der Bohrarbeiten vorgenommen werden.

#### 2.1.2. Die Bauteile

Ein Vertikalfilterbrunnen besteht im Prinzip aus einem perforierten Rohr, mit dessen Hilfe im Grundwasserleiter eine feststofffreie Zone geschaffen wird, so daß sich das dort sammelnde Wasser durch eine Fördereinrichtung (Heber, Unterwassermotorpumpen usw.) entnehmen läßt.

Die Forderung nach einer sand- bzw. schlufffreien Wasserförderung und die Gewährleistung einer gewissen Lebensdauer bedingen dabei - entsprechend dem Aufbau des Grundwasserleiters und der Qualität der Grundwassers - für jeden Brunnen zusätzlich zu dem perforierten Rohr (im folgenden als Filterrohr bezeichnet) den Einsatz weiterer Ausbaumaterialien und -teile.

Eine **B o d e n p l a t t e** sollte stets der untere Abschluß eines jeden Brunnens sein! Da ein vertikaler Wassereintritt bei Filterbrunnen durch den Boden, der stets mit unkontrollierbaren hohen Eintrittsgeschwindigkeiten verbunden ist, zur inneren Erosion im Grundwasserleiter und damit zu unerwünschten Setzungen führen kann, wird es sich stets als vorteilhaft erweisen, die Bodenplatte undurchlässig auszubilden.

Bei Keramik- und Einkornfiltern ist die Bodenplatte durch die Einbautechnologie bedingt. Sie überträgt beim Einbau derartiger Filterrohre deren Gewicht auf das Einbaugestänge und wird deshalb aus Stahl oder Guß gefertigt. Erhält die Bodenplatte keine derartige Belastung, kann als Material auch Holz, Kunststoff oder Keramik verwendet werden.

Ein **S u m p f r o h r** oder **S a n d f a n g** wird für einen Brunnen notwendig, wenn die Forderung nach Gewährleistung eines ungehinderten Wassereintritts auch bis zur Filterunterkante besteht.

Zur Einhaltung dieser Bedingung muß unter dem Filterrohr ein Vollrohr angeordnet werden, in welchem sich mechanische Verunreinigungen, die in das Filterrohr gelangt sind, ablagern können.

Die Reinigung dieses Absetzraumes erfolgt in größeren Zeitabständen und setzt im allgemeinen den Ausbau der Fördereinrichtung voraus.

Der **B r u n n e n f i l t e r** stellt das wichtigste Element des Vertikalfilterbrunnens dar. Von der Funktionstüchtigkeit des Brunnenfilters wird die Leistung und die Lebensdauer der gesamten Brunnenanlage in besonders großem Maße bestimmt.

Der Brunnenfilter besteht im allgemeinen aus einem Filterrohr und Filterstoffen, die den Ringraum zwischen dem Filterrohr und der Bohrlochwand füllen. Als derartige Filterstoffe dienen Sande und Kiese, die auf das Rohr aufgeklebt oder in den Ringraum geschüttet werden, und Filtergewebe. Gelingt es, die Filterkiese oder -sande eigenstabil zu verkleben, so kann man auf das Filterrohr verzichten. Die so entstehenden Bauteile werden nachfolgend als Einkornfilterrohre bezeichnet.

a) Das Filterrohr übernimmt zunächst die mechanische Belastung, die der Erdstoff des Grundwasserleiters auf den Brunnen ausübt. Bei Wasserentnahme aus dem Brunnen, d. h. nach Eintreten eines Potentialgefälles, beginnt das Grundwasser durch das Filterrohr der Entnahmeeinrichtung zuzufließen. Der Eintritt des Wassers ist durch die Perforation (in Form von Schlitzbrücken, Schlitzfenstern und Löchern) möglich. Bei diesem Vorgang werden die Stromfäden, je nach der Gestaltung und Größe der Durchflußflächen, mehrmals umgelenkt, und es kommt vereinzelt zur Wirbelbildung. An scharfen Kanten und Rändern der Öffnungen werden diese Erscheinungen noch verstärkt.

Das Filterrohr besitzt hydraulisch optimales Verhalten, wenn seine freie Durchflußfläche relativ groß, die einzelnen Öffnungen möglichst gleichmäßig verteilt und die Ränder der Öffnungen der Strömung angepaßt sind.

Voraussetzung für eine gute Wirkung des Filterrohres ist darüber hinaus auch das Verhindern der Verklebung der Filteröffnungen durch Erdstoffkörner.

Von der Perforation her unterscheidet man

Schlitzbrückenfilter  
Langlochschlitzfilter und  
Schlitzfilter

In der angegebenen Reihenfolge nimmt die erwähnte Verklebungsgefahr für die Durchflußöffnungen zu.

Als Material für die Filterrohre verwendet man vorwiegend

Kunststoffe  
Keramik  
Stahl und  
Holz

Die Herstellungskosten sind unterschiedlich und beeinflussen damit die Investitionen nicht unwesentlich.

b) Filterkies bzw. Filtersand füllt den Ringraum zwischen Filterrohr und Bohrwand aus. Die Hauptaufgabe dieses Teils des Brunnenfilters besteht darin, den natürlichen Erdstoff des Grundwasserleiters vor Erosion zu schützen, die im allgemeinen durch die bei der Entnahme hervorgerufenen Fließgeschwindigkeiten des Grundwassers eintreten kann.

Filterkiese bzw. -sande müssen möglichst gleichförmig sein. Eine Vielzahl von Versuchen hat ergeben, daß die Ungleichförmigkeitsgrade  $U$  nicht größer als 3 sein dürfen, um Sulfosion und Entmischung zu verhindern, die Kolmationsgefahr zu begrenzen, die größtmögliche Durchlässigkeit zu garantieren und die innere Oberfläche minimal zu halten. (Letzteres ist besonders wichtig zur Verlangsamung der Brunnenalterung.)

Obgleich in der TGL 22 964 die Korngruppen für Filterkies festgelegt sind, werden von den Kieswerken in der DDR. im überwiegenden Maße die Korngruppen

2,00 bis 5,0 mm  
 3,15 bis 7,1 mm  
 5,00 bis 12,5 mm  
 12,50 bis 25,0 mm  
 2,00 bis 8,0 mm  
 3,15 bis 8,0 mm

geliefert und entsprechen damit einer Zusammenfassung von jeweils 2 in der TGL festgelegten Korngruppen. Wie Bild 2/1 deutlich zeigt, liegen die U-Werte dieser Kiese im Mittel mit  $U = 1,7$  relativ niedrig, sodaß sich der handelsübliche Filterkies durchaus auch für den Brunnenbau eignet.

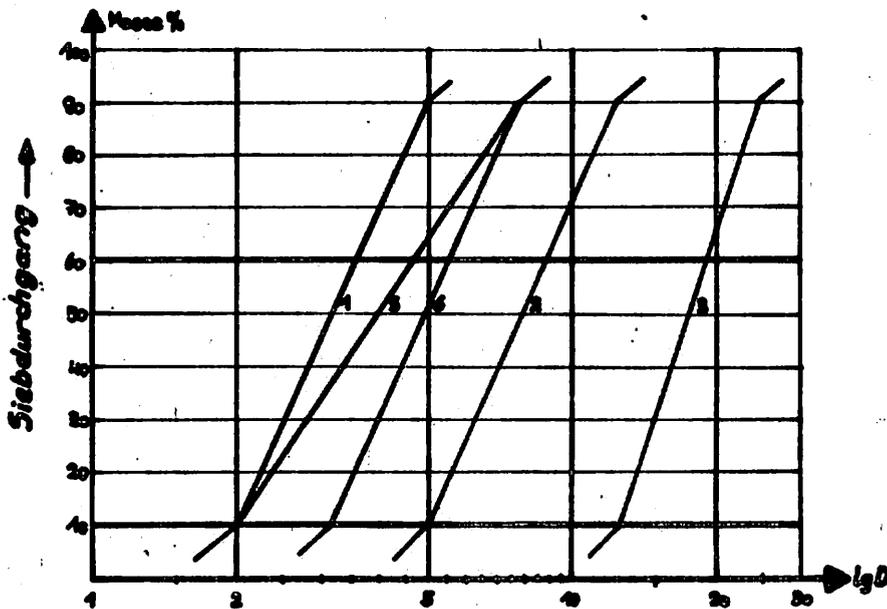


Bild 2/1

U-Werte der lieferbaren Filterkiese bei 10 % Unter- und 10 % Überkorn

| Körnung             | 2 bis 5 | 5 bis 12,5 | 12,5 bis 25 | 2 bis 8 | 3,15 bis 8 |
|---------------------|---------|------------|-------------|---------|------------|
| Probe               | 1,0     | 2,0        | 3,0         | 5,0     | 6,0        |
| $D_{60}$            | 3,5     | 8,6        | 19,0        | 4,6     | 5,5        |
| $D_{10}$            | 2,0     | 5,0        | 12,5        | 2,0     | 3,15       |
| $U = D_{60}/D_{10}$ | 1,75    | 1,7        | 1,5         | 2,3     | 1,7        |

An den Filterkies oder -sand wird außer den oben beschriebenen Bedingungen noch die Forderung gestellt, daß er zur Gewährleistung einer langen Lebensdauer des Brunnens möglichst aus verwitterungsbeständigem Material mit möglichst glatter Oberfläche bestehen soll. Gebrochenes Material ist daher ungeeignet.

Der Einbau soll so erfolgen, daß eine Entmischung weitestgehend wirkungslos bleibt. Vorsicht ist bei Filtersanden und großen Brunnentiefen geboten.

c) Das **Einkornfilterrohr** nimmt eine Sonderstellung ein. Es erfüllt einerseits die Funktion des Filterkieses und andererseits die Aufgabe des Filterrohres. Handelsübliche Einkornfilterrohre sind:

- Betonfilterrohr (zementgebundener Splitt)
- Kiesklebefilterrohr (epoxydharzgebundener oder durch Versinterung verklebter Filterkies)

Sie gewährleisten eine stützkörperfreie, definierte Kiesschüttung auch für größte Einbautiefen.

d) **Filtergewebe** wird im Brunnenbau als Unterlagsgewebe oder Tresse verwendet. Durch Gewebe verringern sich die Größen der Öffnungen des Filterrohres und in Ausnahmefällen wird dadurch eine Filterkiesschüttung nicht mehr erforderlich.

Um der Forderung nach Korrosions- und Quellbeständigkeit sowie nach einer ausreichenden und dauerhaften Festigkeit gerecht zu werden, wird heute nur noch Kunststoffgewebe eingebaut. Entsprechend der Maschenweite unterscheiden wir beim Unterlagsgewebe (quadratische Maschen) folgende Sorten:

| Material   | Gewebeart | Maschenweite<br>[mm] | Drahtstärke<br>[mm] |
|------------|-----------|----------------------|---------------------|
| PVC-Gewebe | Leinen    | 5                    | 1,6                 |
| PVC-Gewebe | Leinen    | 4                    | 1,25                |
| PVC-Gewebe | Leinen    | 3,73                 | 1,6                 |
| PVC-Gewebe | Leinen    | 3,55                 | 1,25                |
| PVC-Gewebe | Leinen    | 2,80                 | 0,8                 |
| PVC-Gewebe | Leinen    | 2,50                 | 0,8                 |
| PVC-Gewebe | Leinen    | 2,24                 | 0,4                 |
| PVC-Gewebe | Leinen    | 2,0                  | 0,8                 |
| PVC-Gewebe | Leinen    | 1,8                  | 0,8                 |
| PVC-Gewebe | Leinen    | 1,25                 | 0,4                 |
| PVC-Gewebe | Leinen    | 1,0                  | 0,4                 |
| PVC-Gewebe | Köper     | 0,9                  | 0,4                 |
| PVC-Gewebe | Köper     | 0,8                  | 0,4                 |

Sie werden im Brunnenbau oft zur Reduzierung der Öffnungen der Stahl- oder Kunststoffschlitzfilterrohre eingebaut. Auf diese Weise wird auch bei der Wahl beliebiger Schlitzweiten die Anwendung nur einer feinkörnigen Kiesschüttung möglich.

Die zweite und eigentlich ursprüngliche Möglichkeit der Verwendung von Unterlagsgewebe besteht im Hinterlegen von Tresse. Filtertresse besitzt im Gegensatz zum Unterlagsgewebe wesentlich kleinere und vor allem schlitzförmige Eintrittsöffnungen. Entsprechend der Gewebedichte (Kettenfäden pro Zoll) unterscheidet man:

| Nr. des Tressengewebes<br>(zugleich Anzahl der<br>Kettenfäden auf 26 mm) | Anzahl der<br>Schußfäden<br>auf 26 mm | Drahtstärke der<br>Kettenfäden | Drahtstärke der<br>Schußfäden |
|--|---------------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|
| 8  | 65                                    | 0,5                            | 0,4                           |
| 10   | 65                                    | 0,4                            | 0,4                           |
| 12   | 65                                    | 0,4                            | 0,4                           |
| 12   | 65                                    | 0,3                            | 0,3                           |
| 16   | 100                                   | 0,25                           | 0,25                          |

Bei der Anwendung solcher Gewebefilter kann dann eine Filterkiesschüttung im allgemeinen entfallen. Für Brunnen mit längerer Lebensdauer und größeren Entnahmeleistungen eignen sich diese Brunnenfilter jedoch nicht. Im allgemeinen ist die Anwendung von Filtertresse im modernen Brunnenbau zu vermeiden!

**Z w i s c h e n r o h r e** sind Vollrohre, die zwischen Filterrohren dort eingebaut werden, wo im zu bewirtschaftenden Grundwasserleiter Schichten oder Einlagerungen reduzierter Durchlässigkeit anstehen, wo eine Entnahme nicht lohnt oder verhindert werden soll.

Das gleiche erfolgt bei einer Entnahme aus mehreren Grundwassersteckwerken für die Bereiche angebohrter Grundwasserstauer.

In Sonderfällen kann sich auch die Notwendigkeit ergeben, daß der Einbau des Saugatzens des Förderorgans im Bereich des Filters erfolgen muß. Unter diesen Umständen ist in diesem Bereich der Einbau eines Zwischenrohres ebenfalls notwendig, um die dadurch zwangsläufig auftretenden erhöhten Eintrittsgeschwindigkeiten (Druckminima) zu vermeiden.

Das **A u f s a t z r o h r** stellt die Verlängerung des Filterrohres in Form eines Vollrohres dar. Dieses Brunnenbauelement wird notwendig, um einerseits die Herstellungskosten zu senken, andererseits eine Belüftung des Filters wie auch den Eintritt von Verunreinigungen aus unbewirtschafteten Horizonten auszuschließen. Das Aufsatzrohr endet am oberen Brunnenabschluß und ist somit die Verbindung zwischen Filter und Brunnenkopf. Die Bedeutung des möglichst luftdichten Abschlusses des Brunnenfilters nimmt mit der Länge der geplanten Bewirtschaftungszeit zu, da bei derartigen Brunnen die Frage der Belüftung im Hinblick auf die Brunnenalterung eine exponierte Stellung einnimmt.

**B r u n n e n p e g e l** werden zur Kontrolle des Leistungsrückganges durch mechanische Kolmation bzw. biochemische Alterung des Filterrohres und der inneren Kiesschüttung in die äußere Kiesschüttung eingebaut.<sup>1)</sup> Die Differenz zwischen den Spiegellagen im Pegel und im Brunnen sowie das Verhalten der Differenz in Abhängigkeit von der Zeit geben dabei Aufschluß über die noch zu erwartende Lebensdauer des Brunnens, über dessen momentane Leistungsgrenze und deren Entwicklung.

Ein **B r u n n e n k o p f** erhält jeder Brunnen als oberen Abschluß, ausgenommen die kurzlebigen Absenkungsanlagen (Baugrubenentwässerung). Dieses Bauteil kann oberirdisch wie unterirdisch angeordnet werden und hat die Aufgabe, den Brunnen und die Fördereinrichtungen einschließlich der Förderleistung mit den Armaturen vor klimatischen Einflüssen und Verunreinigungen zu schützen.

Die Verbindung zwischen Brunnenkopf und Brunnen übernimmt - durch zu erwartende Setzungen bedingt - ein bewegliches, aber dabei dichtes Formstück, über das auch die Fördereinrichtung in das Brunneninnere gelangt.

---

<sup>1)</sup> Im Normalfall erhalten Brunnen heute nur eine Kiesschüttung. Der Brunnenpegel ist dann in der Kiesschüttung möglichst weit außen anzuordnen.

## 2.2. Allgemeine Konstruktionsregeln

Die Bemessung eines Vertikalfilterbrunnens beginnt in der Regel mit der Auswahl des Filterrohres, was in Abhängigkeit von der Fördermenge, der Wasserqualität, dem Gebirgsdruck und der geplanten Lebensdauer des Brunnens erfolgt.

Der Preis für Filterrohre schwankt in Abhängigkeit vom Material und der Konstruktion in relativ großen Grenzen, sodaß mit dieser Wahl die Herstellungskosten des gesamten Brunnens maßgebend beeinflusst werden.

Plaste- und Keramikfilter bieten durch die Eigenschaften ihrer Grundstoffe und durch ihre relativ glatten Oberflächen einen anhaltenden Korrosionsschutz auch bei äußerst stark verunreinigtem Grundwasser und bieten damit gute Voraussetzungen für eine lange Lebensdauer. Hinzu kommt, daß dieses Material unempfindlich gegen Regenerierungsarbeiten mit Chemikalien ist. Da der Preis dieser Filterrohre verhältnismäßig hoch ist, werden sie zum überwiegenden Maße in solche Brunnen eingebaut, von welchen maximale Funktionssicherheit und Lebensdauer gefordert werden.

Der Stahlfilter kann die gleichen guten Eigenschaften erhalten, wenn es gelingt, ihn mit einem vollkommenen Kunststoffüberzug zu versehen.

Verwendet man das Stahlfilterrohr ungeschützt, so ist es relativ starker Korrosion durch das Grundwasser unterworfen, denn dieses ist nur in Sonderfällen nicht metallaggressiv.

Die Lebensdauer derartiger Konstruktionen kann durch eine gewisse Variation in den Wandstärken beeinflusst werden, ohne daß aber eine Versetzung der Schlitze vermeidbar ist. Die günstigen Eigenschaften der ersten Gruppe werden von Stahlfilterrohren nicht erreicht. Darüber hinaus ist die Oberfläche des ungeschützten Stahlfilterrohres rau und stellt eine gute Kontaktfläche für eine beschleunigte Verockerung dar. Eine eventuelle Regenerierung (gleich mit welchen Hilfsmitteln) vergrößert die ursprünglich vorhandenen Kontaktflächen derart, daß eine solche Maßnahme nur für eine nachfolgende kurze Betriebszeit eine Verbesserung verspricht.

Eine Mittelstellung zwischen kunststoffüberzogenen und ungeschützten Stahlfilterrohren nimmt der verzinkte Stahlfilter ein. Der Einsatz eines solchen Filters in Versorgungsbrunnen kann nur basierend auf der zu erwartenden Wasserqualität entschieden werden und wird nur selten vertretbar sein.

Filterrohre aus korrosionsbeständigen Metallegierungen oder Holzfilterrohre werden heute nicht mehr industriell gefertigt und bleiben deshalb nachfolgend unbesprochen.

Betonfilterrohre sind die verbreitetsten stützkörperfreien Filterrohre. Sie sind im allgemeinen wenig funktionssicher, da das Klebemittel (Zement) durch die Kalkaggressivität des Grundwassers relativ schnell ausgewaschen wird. Begründet im äußerst niedrigen Preis wird der Betonfilter jedoch oft für kurzlebige Brunnen (Absenkungsbrunnen) verwendet.

Der Kiesklebefilter wird künftig an Bedeutung gewinnen und eventuell die Wertigkeit der Plaste- und Keramikfilter annähernd erreichen. Gegenwärtig ist die Dauerfestigkeit noch nicht ausreichend erwiesen. Die Produktion dieser Filter befindet sich heute noch in der Entwicklungsphase, wird künftig aber von nicht zu unterschätzender Bedeutung sein.

Der Art der Perforation des Filterrohres kommt insofern eine Bedeutung zu, da sie die äußere Kolmation des Filterrohres direkt beeinflusst.

- a) Schlitzbrückenöffnungen erscheinen als günstigste Lösung, da sie die Verklemmungsgefahr weitestgehend ausschließen. Durch die Abweisung des Filterkieses bleibt im allgemeinen die gesamte Durchflußöffnung für den Wassereintritt erhalten, sodaß die Eintrittsverluste minimal bleiben. Inwieweit die zwangsläufig mehrmalige Stromfadenablenkung und die damit

verbundene Wirbelbildung ein Nachteil im Hinblick auf die Alterung darstellt, ist gegenwärtig ungenügend geklärt.

Die Innenseite der Filterrohre bietet bei der Schlitzbrückenlochung für den im Filterrohr auftretenden vertikalen Wasserstrom praktisch kein Hindernis, sodaß das Rohr an sich hydraulisch glatt wirkt.

- b) Löcher als Perforation stellen eine ungünstige Lösung dar, da bei einer Verklebung von Erdstoffteilchen in den Löchern die freie Eintrittsfläche bis auf wenige Prozent abgemindert wird und die Voraussetzung für eine nachfolgende schnelle Kolmation der verbleibenden kleinen Öffnungen durch suffundierte Teilchen gegeben ist.

Eine Zwischenstellung nehmen die Langloch- oder Schlitzöffnungen ein. Diese Konstruktion wird heute noch für den größten Teil der Filterrohrarten gewählt, obgleich die Funktionstüchtigkeit des Rohres bei Suffosion des natürlichen Erdstoffes in Zusammenarbeit mit einer Verklebung der Filterkieskörner in den Schlitzern schnell absinken kann.

Als Sonderform ist in diese Gruppe der Rippenfilter einzuordnen. Die Form der kiesabweisenden Rippen bewirkt, daß die Stromfäden bis zum Eintritt in das Filterrohrinnere eine sehr günstige Bahn aufweisen. Allerdings wirken die Aussteifungsrippen im Inneren der Rohre für die vertikale Wasserströmung als Hindernisse (große hydraulische Rauigkeit).

- c) Die haufwerksporige Durchlässigkeit der Einkornfilter ist im Gegensatz zu den beschriebenen Varianten verhältnismäßig klein und damit neigt auch eine solche Konstruktion, wenn sie nicht durch eine geeignete Kiesschüttung geschützt ist, bei suffosionsgefährdetem Grundwasserleiter zur Kolmation. Der Vorteil der Haufwerksporigkeit besteht darin, daß infolge der reduzierten Durchlässigkeit Spitzenwerte der Eintrittsgeschwindigkeit kaum auftreten, sodaß derartige Filterrohre relativ gleichmäßig angeströmt werden.

Bei der Dimensionierung der Öffnungsweiten der Perforation sollte davon ausgegangen werden, daß für den Erosionsschutz des natürlichen Erdstoffes des Grundwasserleiters eine einfache Filterkiesummantelung ausreichend ist. Diesem Filterkies sind die Öffnungsweiten anzupassen. Obgleich eine mehrfache Kiesschüttung mit gewissem technischem Aufwand möglich ist, sollte sie auf Sonderfälle beschränkt bleiben.

Die Länge der Filterrohrstrecken eines Brunnens ist bei geplanter großer Lebensdauer zugunsten eines größeren Filterdurchmessers möglichst klein zu wählen, um so die Entnahme von sauerstoffarmen Wasser aus möglichst tiefen Zonen des Grundwasserleiters zu gewährleisten. Hinzu kommt, daß zur Vermeidung vertikaler Wasserbewegungen im Grundwasserleiter in unmittelbarer Nähe des Brunnens nur die durchlässigsten Horizonte des Grundwasserleiters mit Filterrohren und Filterkiesen ausgebaut werden sollten.

Die Filterrohroberkante darf keinesfalls höher als 1 m unter dem tiefsten abgesenkten Brunnenwasserspiegel angeordnet werden. Der Saugstutzen der Fördereinrichtung befindet sich im Regelfall über dem Filterrohr. Er muß mindestens 0,5 m über der Filterrohroberkante angeordnet werden, so daß die Filterrohroberkante oft tiefer 1 m unter dem Brunnenwasserspiegel anzuordnen ist.

Bei kurzlebigen Brunnen, bei welchen große Eintrittsgeschwindigkeiten und unkontrollierte Austauschströmungen in Brunnennähe eine untergeordnete Rolle spielen, ist die Filterrohrlänge aus wirtschaftlichen Erwägungen jedoch ebenfalls möglichst kurz zu halten.

Die Nennweite der Filterrohre wird einerseits (so lange noch keine geeigneten Schutzverfahren gegen Brunnenalterung marktfähig sind) durch die Festlegung einer kritischen Eintrittsgeschwindigkeit zusammen mit der Filterrohrlänge festgelegt und andererseits in Abhängigkeit von den Abmessungen der Fördereinrichtung so bestimmt, daß der Saugschenkel und die Unterwassermotorpumpe ohne Beschädigungsgefahr für das Filterrohr und die Fördereinrichtung montierbar und demontierbar sind.

Die Geschwindigkeiten im Ringraum dürfen dabei 1 bis 2 m/s nicht übersteigen.

Der Filterkies ist stets im Zusammenhang mit dem Filterrohr zu betrachten. Besonders zeigen die Filterkiese mit unterschiedlichen Korngrößen nur unwesentliche Differenzen. Dieser Parameter spielt somit zwar bei einer ökonomischen Variantenuntersuchung eine untergeordnete Rolle, die Wahl der Korngrößen und die Anordnung der Kiesummantelung beeinflusst aber im entscheidenden Maße die Leistungsfähigkeit und die Lebensdauer des Brunnens.

Der Filterkies ist so um das Filterrohr anzuordnen, daß Kurzschlußströmungen prinzipiell ausgeschlossen werden. Aus diesem Grunde erfolgt einerseits eine 0,5 bis 1,0 m große Über- bzw. Unterschüttung der Filterrohrstrecke und andererseits die Festlegung einer Mindestschüttungstärke von 10 bis 15 cm. Der notwendige Bohrdurchmesser ist somit von der festgelegten Größe des Filterrohrdurchmessers und der Mindestschüttstärke abhängig.

Die Mindeststärke des Kiesmantels von 10 bis 15 cm garantiert einen hohlraumfreien Einbau für Brunnen bis etwa 50 m Tiefe. Zur Sicherung einer gleichmäßigen Brunnenanströmung wird durch sogenannte Abstandshalter eine gleichstarke Schüttungsschicht angestrebt.

Zur Vermeidung zusätzlicher unnötiger Alterungserscheinungen des Brunnens ist der Ausbau so zu gestalten, daß der Durchfluß durch die Filterkies- bzw. Filtersandschicht nur horizontal erfolgt. Diese Forderung kann erfüllt werden, wenn in den Bereichen, die mit Zwischenrohren ausgebaut wurden, bzw. im Bereich unmittelbar über der Kiesschüttung (etwa 0,5 m) möglichst undurchlässiges Material (Tonkugeln) eingebracht werden.

Ist das Filterrohr tiefer als 50 m unter Geländeoberkante angeordnet, nimmt bei der Einbringung (Schüttung) von Filterkies die Entmischungsgefahr und die Gefahr der Hohlraumbildung so stark zu, daß nur noch Kiespackungen oder Einkornfilter angewendet werden dürfen.

Das Filtergewebe bewirkt eine Verringerung der Größe der Schlitze und Löcher im Filterrohr. Eine feste Verbindung zwischen dem Gewebe und dem Filterrohr ist unbedingt sicherzustellen, sodaß beim Einbau keine Verschiebungen auftreten können.

Die Unterlagsgewebe ermöglichen auf diese Weise oftmals die Vermeidung einer Mehrfachschüttung.

Filtertresse sollte wegen der akuten Verklemmungs- und Kolmationsgefahr infolge der geringen Schlitzweiten nur bei sehr feinkörnigen, dabei aber suffosionssicheren Grundwasserleitern angewandt werden. Zur Sicherung der Wirksamkeit der gesamten Gewebefläche ist die Tresse mit Unterlagsgewebe zu unterlegen.

Der Sandfang wird im Normalfall mit einer Länge von 1 m ausgebildet. Müssen die Zeitabstände für die Reinigung infolge von Schwierigkeiten beim Ausbau der Fördereinrichtung extrem lang gewählt werden, ist es vorteilhaft, die Länge des Sandfanges entsprechend zu vergrößern. Eine Verlängerung wird ebenfalls notwendig, wenn der Saugstutzen der Fördereinrichtung innerhalb des Sandfanges angeordnet werden soll. Der Abstand des Entnahmestutzens von der Filterunterkante sollte dabei 0,5 m möglichst wieder überschreiten.

Der Durchmesser des Sandfanges ist entsprechend dem des Filterrohres zu wählen, um von vornherein spezielle Übergangsformstücke zu vermeiden.

Zwischen- und Aufsatzrohre müssen prinzipiell die gleichen Nennweiten wie das Filterrohr besitzen, um ebenfalls die Forderung nach einer leichten Montage und Demontage der Fördereinrichtung zu garantieren. Hinzukommt, daß eine mechanische Regenerierung am wirksamsten durchgeführt werden kann, wenn der Ausbau mit einem einheitlichen Durchmesser erfolgte. Abgesehen von dieser Forderung ist bei der Dimensionierung anzustreben, daß die vertikalen Strömungsgeschwindigkeiten im Inneren der Filter-, Zwischen- und Aufsatzrohre keine extremen Werte annehmen. Wenn man davon ausgeht, daß in dem Ringraum zwischen der Pumpe und dem Aufsatzrohr

die maximale Geschwindigkeit 2 m/s bzw. zwischen dem Saugschenkel und dem Filterrohr (wenn die Entnahme aus dem Sandfang erfolgt) 1 m/s nicht übersteigen darf, bleiben die Reibungsverluste und die anteilige kinetische Energiehöhe in vertretbaren Grenzen.

Die Länge der Zwischenrohre und des Aufsatzrohres ergeben sich zwangsläufig aus der Lage der Filterkanten bzw. des Brunnenkopfes. Ist durch den Pumpeneinbau ein Zwischenrohr bedingt, so sollte seine Länge etwa 2 m betragen.

Im Sinne einer ökonomischen und dabei technisch ansprechenden Gestaltung der Brunnen wäre es sehr vorteilhaft, wenn die Dimensionierung der Anbauteile (Filter- und Vollrohre) einheitlich würde, sodaß die Kombination von unterschiedlichen Materialien möglich wäre.

### 2.3. Die Problematik der Brunnenalterung

Mit der Erfüllung der in den Abschnitten 2.1., 2.2. und 3. erhobenen Forderungen ist die Standsicherheit und Leistungsfähigkeit eines Brunnens zum Zeitpunkt der Bauabnahme gesichert. Bis zur Inbetriebnahme des Brunnens und während des Betriebes ist der Brunnenfilter jedoch vielfältigen hydrochemischen und mikrobiologischen Bedingungen unterworfen, die oft entscheidend zu einer seitlich fortschreitenden Verschlechterung der anfänglichen hydraulischen Eigenschaften führen.

Somit stellt die Erfüllung der Forderungen der Abschnitte 2.1., 2.2. und 3. eine notwendige, jedoch nicht immer hinreichende Bedingung zur Bemessung eines Brunnenfilters dar.

Die Verschlechterung der anfänglichen statischen und hydraulischen Eigenschaften des Brunnenfilters wird als Brunnenalterung bezeichnet. Praktisch bewirkt die Brunnenalterung einerseits ein Nachlassen der Tragfähigkeit der Bauteile und andererseits eine Abnahme der Durchlässigkeit des Brunnenfilters. Bei näherer Betrachtung läßt sich der Ursachenkomplex, abgesehen von rein physikalischen Effekten (Kolmation), die in den zitierten Abschnitten dargestellt sind, in Korrosion, Verockerung und Versinterung aufteilen.

Am stärksten tritt in der Praxis die Verockerung als Ursache der Brunnenalterung hervor, während die Korrosion durch geeignete Ausbaumaterialien und Dimensionierung der Anbauteile vermieden bzw. unwirksam gemacht werden kann und die Versinterung im größeren Ausmaß auf ungünstige Rohwässer (Verschiebung des Kalk-Kohlensäure-Gleichgewichtes) beschränkt bleibt.

Die Ursachen und vielschichtigen Zusammenhänge der Brunnenalterung sind entsprechend dem gegenwärtigen Stand der Forschung zum großen Teil noch ungeklärt, sodaß es in diesem Rahmen nicht möglich ist, durch Regeln zur Bemessung der Brunnenfilter diesen Erscheinungen ganz konkret entgegenzuwirken.

Die folgenden Ausführungen beschränken sich deshalb auf die Formulierung einiger Grundsätze, die zwar hypothetischen Charakter tragen und damit im WAFRO 1.42. noch keinen Niederschlag finden, die aber für künftige Untersuchungen richtungweisend sein können.

1. Grundsatz: Der Fließzustand am und im Brunnenfilter ist kein Bemessungskriterium der Brunnenalterung. Die Reynoldssche Zahl als Maß dieses Fließzustandes kann deshalb ohne Beziehung zu biochemischen Faktoren nur zu hydrodynamischen Vergleichen herangezogen werden, nicht aber begrenzender Faktor im Sinne eines kritischen Fließzustandes sein.

Die Festlegung der oberen Grenze der Anströmungsgeschwindigkeit im Werkstandard WAFRO 1.42. muß daher in künftigen Untersuchungen überprüft werden.

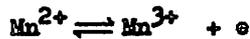
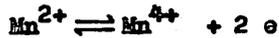
2. Grundsatz: Obwohl Gleichförmigkeit und Rundheit (Achsenverhältnis) des Filterkornmaterials und hydrodynamisch günstigste Formen der Filterschlitz anstreben sind, sind nicht die Abweichungen hiervon für die Brunnenalterung entscheidend, sondern

ungleich stärker die Rauigkeit der Kern- und Filterrohroberfläche sowie deren chemische Verunreinigung bzw. ihr chemisches und elektrisches Verhalten.

3. Grundsatz: Durch Auswahl geeigneter Werkstoffe oder Schutzüberzüge für alle Filterbauteile ist die Korrosion auch als verockerungsfördernde Erscheinung ( $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Mn}^{2+}$ -Donator) auszuschließen.

4. Grundsatz: Notwendige Bedingungen für die Brunnenverockerung sind

a) mindestens ein Redoxsystem der Art



b) anorganische und bzw. oder organische Kohlenstoffdonatoren ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$  usw.),

c) anorganische und bzw. oder organische Elektronenakzeptoren ( $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$  usw.)

d) ein optimaler pH-Bereich ( $>3 \dots 4$ )

e) ein ausreichender Nachschub, sodaß für die Bedingungen a bis c keine Gleichgewichtszustände eintreten können.

Eine ebenso notwendige Bedingung für die Brunnenverockerung ist der Sauerstoffgehalt des Wassers, dessen Größe von enormer Bedeutung ist. Dieser Sauerstoff kann aus Sauerstoffeintrag oder biochemischen Reduktionsvorgängen (Lebensgemeinschaften) herrühren.

Bei Erfüllung dieser Bedingungen findet eine Verockerung statt, wobei die Größenordnung aller Bedingungen und ihre gegenseitige Zuordnung über die Intensität der Verockerung sowie deren biochemischen oder rein chemischen Anteil entscheiden. Die Anwesenheit entwicklungsfähiger Biomassen kann dabei latent vorausgesetzt werden.

5. Grundsatz: Das Redoxpotential des Wassers am Brunnenfilter ist eine integrale Darstellung des Milieus und nur in normalen Fällen und bei richtiger Messung ein Kennwert.

Nach Hässelbarth/Lüdemann ist ein Redoxpotential gegen die Normalwasserstoffelektrode  $E_{\text{H}_2\text{O}} > -10 \text{ mV} \pm 20 \text{ mV}$  die Bedingung für ein verockerungsförderndes Milieu. Berücksichtigt man den pH-Wert des Wassers, so gilt  $r_h 14,5 \pm 1$  für diesen Wert.

6. Grundsatz: Die gleichmäßige Durchströmung aller Filterbereiche ohne hydrodynamische Störungszonen ist vorteilhaft und verhindert von dort ausgehende Verockerungserscheinungen.

Aus den dargelegten 6 Grundsätzen lassen sich einige Folgerungen aufstellen, die dazu geeignet sind, die Brunnenalterung zu verzögern, wenn nicht gar zu verhindern.

1. Der Sauerstoffeintrag in das Grundwasser ist durch gleichmäßigen Betrieb der Brunnen (Vermeidung einer Atmung im Bereich der Kapillarzonen) und vor allem durch sorgfältige Abdichtung des Brunnenkopfes und der Anordnung des Saugstutzens über der Filteroberkante möglichst einzuschränken (kein Transport des sauerstoffreicheren Wassers der oberen Zo-

nen im Filterrohr).

2. Es ist einer verbreiteten Gewohnheit entgegenzutreten, wonach Brunnen unbedacht lange vor ihrer Inbetriebnahme gebaut und dann stehengelassen werden. Durch diese Maßnahme tritt zwar keine größere Verockerung ein, jedoch wird eine gleichmäßig dichte Besiedlung aller Oberflächen mit Bakterienkulturen und Kontaktstoffen erreicht, die dann bei Inbetriebnahme und Eintreten günstigerer Lebensbedingungen sofort voll produktionsfähig werden. Die bis dahin notwendigen Wachstumsbedingungen werden vorwiegend durch Strömungen geschaffen, die durch schichtungsbedingte Potential-, Konzentrations- und Wärmeunterschiede hervorgerufen werden.
3. Die notwendige gleichmäßige Filteranströmung wird durch konstruktive Ausnutzung der Erkenntnisse der Potentialströmungstheorie in geschichteten Bodenkörpern angestrebt.

Danach sind nur die durchlässigsten Schichten mit Filterrohren auszubauen, im Bereich der Vollrohrstrecken nicht Kies, sondern schwerdurchlässige Massen zu schütten. Bei ungeschichtetem Grundwasserleiter ist nur die untere Zone mit Filtern auszubauen, Hydrodynamische Störungszonen (Filterober- oder -unterkanten) sind durch differenzierte Kiesschüttungen (höhere Widerstände) auszugleichen und der Filter ist so tief wie möglich anzuordnen. Tief liegende Filter sind nicht nur aus Gründen der Alterung zu fordern, sondern bieten auch darüberhinaus Vorteile (z. B. zusätzliche Speicherreserve).

4. Die Filterfläche - allerdings unter Beachtung von Folgerung 3 - soll im Hinblick auf Grundsatz 4 nicht überbemessen werden. Die Anwendung wirksamer Schutzverfahren gegen Verockerung bzw. die Anwendung hochwertiger Werkstoffe bedingt als optimierenden Faktor die Begrenzung der Filterfläche auf ein notwendiges und hinreichendes Maß.

Der Angabe allgemeiner Regeln und Konstruktionsbeispiele sind vorerst Grenzen gesetzt, weil jeder Ausbaufall in seiner ganzen Komplexität ingenieurtechnisch erfaßt werden muß und der gegenwärtige Erkenntnisstand bezüglich der Verockerungserscheinungen noch zu lückenhaft ist. Im Werkstandard WAFRO 1.42. soll durch Einhaltung einer gewählten Mindestanströmungsgeschwindigkeit einer Filterüberbemessung begegnet werden. Die Größe der zu wählenden Mindestgeschwindigkeit gilt es bei weiteren Untersuchungen zu überprüfen.

#### 2.4. Nachbehandlung der Vertikalfilterbrunnen

Nach Fertigstellung des Brunnenausbaues wird im Regelfall jeder Brunnen, ausgenommen die kurzlebigen Absenkungsbrunnen, einem ersten Probetrieb unterzogen.

Ziel der probeweisen Bewirtschaftung ist einmal der Nachweis der Leistungsfähigkeit der Anlage, zum anderen aber die Herstellung eines natürlichen Filters außerhalb der Bohrung, sodaß bei der künftigen Bewirtschaftung Suffosionserscheinungen ausgeschlossen sind und der Brunnen ein feststofffreies Wasser fördern kann. Gleichzeitig werden dabei die bakteriellen Verunreinigungen, die zwangsläufig dem Ausbaumaterial durch Transport, Lagerung und Einbau anhaften, zum größten Teil ausgetragen.

Beim Abpumpbetrieb ist zur Gewährleistung einer einwandfreien Kornbrückenbildung in Verbindung mit einer Begrenzung der Suffosion die Entnahmemenge stufenweise zu steigern. Bei ordnungsgemäßem Ausbau sind Suffosionserscheinungen wenige Stunden nach der Leistungssteigerung abgeschlossen. Die größte ausgespülte Körnung muß etwa der berechneten entsprechen, widrigenfalls liegen Ausbaufehler vor, und die zulässige Fördermenge dieses Brunnens ist dann soweit zu reduzieren, bis diese Erscheinungen nicht mehr auftreten.

Unter Normalbedingungen staffelt man die Abpumpleistung in 3 Stufen und hält diese möglichst bis zum Erreichen eines Beharrungszustandes. Die maximale Entnahmemenge sollte die geplante

Bewirtschaftungsmenge um mindestens 20 % übersteigen, allerdings darf dabei die Absenkung nicht größer als  $H/2$  werden. Ein derartiger Pumpversuch macht bei einem Brunnen, dessen Bohrung im Stauchbohrverfahren niedergebracht worden ist und der auch bei der größten Stufe der Abpumpleistung keine Suffosionserscheinungen gezeigt hat, jede weitere Nachbehandlung unnötig.

Vor Beginn dieses Leistungspumpversuches wird teilweise durch eine sogenannte Intensiventnahme oder Intensiventsandung eine abschnittsweise Belastung des Brunnenfilters durch extrem hohe spezifische Entnahmemengen vorgenommen. Beabsichtigt wird dabei eine maximale Suffosion und eine begrenzte Kontakterosion. Die Kornbrückenbildung wird dabei durch Pulsationsbetrieb verhindert.

Ein derartiges Vorgehen hat nur Sinn, wenn außerhalb des Filterrohres kein eingebrachter Filterkies ansteht, sodaß Vertikalströmungen im Kiesmantel ausgeschlossen sind und die Intensiventnahme tatsächlich aus einem engbegrenzten Teilbereich des Grundwasserleiters erfolgt.

Die Voraussetzungen sind demnach für diese Nachbehandlungstechnologie nur gegeben, wenn die Filterrohre ohne Bohrrohre eingespült werden und der eigentlich notwendige Kiesfilter aus den Erdstoffen des Wasserleiters geschaffen werden muß. Da eine derartige Bewirtschaftung die Gefahr eines Erosionsbruches, der die Brunnen unbrauchbar macht, jederzeit in sich birgt und der sich aufbauende Filter kaum eine größere Dicke als 5 bis 7 cm erreicht, sollte bis auf Brunnen, die direkt im Spülbohrverfahren abgeteuft werden, von dieser Technologie kein Gebrauch gemacht werden.

Literaturverzeichnis 2

- / 1 / ANACKER, H. und RIEMPP, G.  
Stand und Entwicklungstendenzen im Ausbau von Bohrbrunnen mit Kies-  
schüttung für die Wasserversorgung  
WWT, Berlin 18 (1968) 11/12, S. 369
- / 2 / NAHRGANG, G.  
Zur Theorie des vollkommenen und unvollkommenen Brunnens  
Berlin - Göttingen - Heidelberg, Springer-Verlag 1954
- / 3 / BIESKE, E.  
Handbauch des Brunnenbauers, Band II  
Verlag R. Schmidt, Berlin 1965
- / 4 / BIESKE, E.  
Verockerung und Alterung von Bohrbrunnen  
BER, Jg. 11, 1960
- / 5 / HÜHNERBERG, K.  
Brunnenalterung und ihre Bekämpfung  
BER, Jg. 17, 1966, H. 11, S. 455 bis 461
- / 6 / HÜHNERBERG, K.  
Neue Erkenntnisse beim Bau und Betrieb von Brunnen  
Gas- und Wasserfach, Jg. 108, 1967, H. 32, S. 919 bis 923
- / 7 / BOORSMA, H.-J.; JANSSEN, M. A. und J. HAANOO, J.  
Zur Frage der Dimensionierung von Bohrbrunnen  
Gas- und Wasserfach, Jg. 100, H. 2, S. 33 bis 36
- / 8 / HASSELBARTH, LÜDEMANN  
Biologische Verockerung von Brunnen durch Massenentwicklung  
von Eisen- und Manganbakterien  
BER, Jg. 18, 1962, H. 10, S. 363 bis 368
- / 9 / LUESCHOW LLOYD, A.; MACKENCHUN and HENNETH, H.  
Detection and enumeration of iron bacteria in municipal water  
supplies  
JWWA, Juni 1962, S. 751 bis 756
- / 10 / LÖSE, J. R. und H. BRANDNER  
Mikrobiologische Studien an manganoxidierenden Bakterien  
Zentralblatt für Bakteriologie, Jg. 120, 1966, S. 480
- / 11 / ROSENER, M.  
Zur Frage der Eisenbakterien  
Erdölseitschrift, Jg. 78, H. 7, 1962, S. 440 bis 443
- / 12 / STARKEY, R. L.  
Anfällung von Ferrihydrat durch Eisenbakterien  
Zeitschrift Science, Jg. 102, 1945, Nr. 26/56, S. 532 bis 533

/ 13 /

**SEELMEYER**

Über die biologische Eisenkorrosion

Werkstoff und Korrosion, 1953, H. 4, S. 241 bis 247

/ 14 /

**WOLFE, R. F.**

Eisen- und Manganbakterien

Heukelekian H. Dondero

NC 1964, Wiley & Son, New York, S. 82 bis 87

/ 15 /

Tagchenbuch der Wasserversorgung

**KITTNER, STARKE, WISSEL**

Laufende Nummern: 26, 69, 78, 85, 114, 130, 131, 141,  
146, 152

### 3. Grundlagen der Stabilität von Erdstofffiltern im Brunnenbau

#### 3.0. Verwendete Symbole

- $A = \frac{D}{d}$  - Abstandsverhältnis der Korndurchmesser zweier unterschiedlicher Korndurchmesser an einer gemeinsamen Kontaktfläche. Bei mehreren Filterschichten auch  $A = D_{II}/D_I$
- $A_{50} = \frac{D_{50}}{d_{50}}$  - dito, für die Korndurchmesser des Filtererdstoffes und des Erdstoffes des Grundwasserleiters bei jeweils 50 % der Kornverteilungslinien
- $A_{50, \text{ vorh}}$  - vorhandenes Abstandsverhältnis, sonst wie vor
- $A_{50, \text{ zul.}}$  - zulässiges Abstandsverhältnis, um die Kontakterosion zu verhindern
- $a^* = \frac{D_p}{1,1 \cdot d_p}$  - reziproker Schlupffaktor zwischen Filterpore und maximalem Suffosionskorn, einschließlich der gebundenen Wasserhülle, welcher die Nichtkolkation garantiert (siehe Gleichung 30 und Tabelle 1)
- $D$  - Korndurchmesser des Filtererdstoffes
- $D_I$  - dito, der ersten feineren Filterschicht
- $D_{II}$  - dito, der zweiten gröberen Filterschicht
- $D_{\text{maßg}}$  - maßgebender Korndurchmesser des Filtererdstoffes, welcher die Schlitsc im Brunnenfilterrohr nicht passieren darf
- $D_{\text{min}}$  - minimaler Korndurchmesser des Filtererdstoffes
- $D_p$  - Porendurchmesser des Filtererdstoffes
- $D_p, \text{ maßg}$  - für die Sicherheit gegen Kontakterosion maßgebender Porendurchmesser des Filtererdstoffes
- $D_\epsilon = \frac{\epsilon_0 - \epsilon_n}{\epsilon_0 - \epsilon_d}$  - Lagerungsdichte eines Erdstoffes
- $D_{\epsilon, \text{maßg}}$  - für die Kontakterosion maßgebende Lagerungsdichte gemäß Gleichung (43)
- $D^*$  - in der TGL 22 964 als unterer Grenzwert genannter Korndurchmesser eines Filterkieses bzw. -sandcs
- $d$  - Korndurchmesser der Erdstoffe vom Grundwasserleiter
- $d_{a, \text{max}}$  - die bei Horizontalfiltersträngen und Johnsonbrunnen durch die Schlitsc im Brunnenrohr maximal auswaschbare Korngröße
- $d_{a, \text{mind}}$  - dito, jedoch die mindestens auswaschbare Korngröße
- $d_{\text{maßg}}$  - für die Sicherheit gegen Kontakterosion maßgebender Korndurchmesser der Erdstoffe vom Grundwasserleiter
- $d_{\text{max}}$  - maximaler Korndurchmesser ( $\hat{=} d_{100}$ )
- $d_{\text{min}}$  - minimaler Korndurchmesser ( $\hat{=} d_0$ )

- $d_i$  (z. B.  $d_{10}$ ,  $d_{17}$ ,  $d_{50}$ ,  $d_{60}$ )  
- Korndurchmesser bei  $i$  % (10, 17, 50 und 60 %) der Kornverteilungslinie
- $d_p$   
- Porendurchmesser des Erdstoffes vom Grundwasserleiter
- $d_{p,sk}$   
- Porendurchmesser des Erdstoffskeletts vom Grundwasserleiter
- $d_s$   
- maximaler Korndurchmesser, der durch Suffosion aus einem Erdstoff ausgewaschen werden kann
- $d_{sk}$   
- rechnerischer Korndurchmesser des Erdstoffskeletts
- $d_{10,F}$   
- Korndurchmesser  $d_{10}$  der Erdstoffskelettffüllung
- $d_{10,sk}$   
- Korndurchmesser  $d_{10}$  des Erdstoffskeletts
- $F_D = F_s \cdot F_G (= F)$   
- Durchgangsfaktor bei Untersuchungen zur Kontakterosion
- $F_G$   
- Gewölbebildungsfaktor
- $F_s$   
- Schlupffaktor
- $F_R$   
- Querschnittsfläche einer Stromröhre
- $g$   
- Erdbeschleunigung ( $981 \text{ cm/s}^2$ )
- $h$   
- lichte Brückenhöhe im Schlitzbrückenfilterrohr
- $J$   
- Grundwassergefälle
- $J_{K,krit}$   
- dito, bei dem die Kontakterosion beginnt
- $J_{K,Setzung}$   
- dito, bei dem nach fortschreitender Kontakterosion erste Setzungen des Erdkörpers am Brunnenrand beobachtet werden
- $J_{S,krit}$   
- dito, bei dem die Suffosion beginnt
- $J_{vorh}$   
- vorhandenes Grundwassergefälle
- $k$   
- Wasserdurchlässigkeitsbeiwert
- $k_E$   
- dito, des gesamten Erdstoffes
- $k_F$   
- dito, der Skelettffüllung des Erdstoffes
- $n$   
- Porenanteil eines Erdstoffes
- $n_E$   
- dito des gesamten Erdstoffes
- $n_F$   
- dito, der Skelettffüllung
- $n_f$   
- dito, des Filtererdstoffes
- $n_g$   
- dito, der Erdstoffes vom Grundwasserleiter

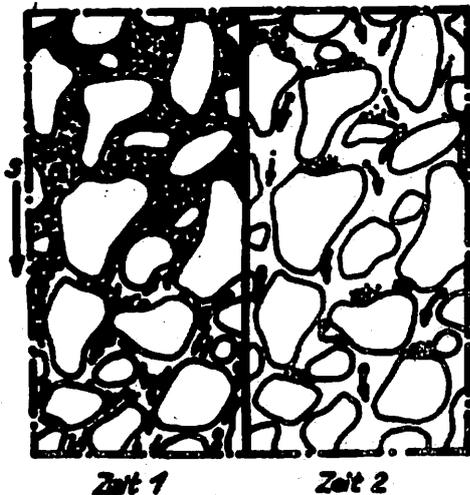
- $P_1$  - Masseprozent der Kornfraktionen mit dem Korndurchmesser  $d \leq d_1$
- $P_a$  - dito, die durch Kontakterosion an Horizontalfiltersträngen bzw. Johnsonbrunnen ausgewaschen werden dürfen
- $Q_R$  - Durchfluß durch eine Stromröhre
- $s$  - Schlitzweite im Langlochfilterrohr
- $t$  - Filterschichtdicke
- $t_a$  - Tiefe der Auswaschungzone an Horizontalfiltersträngen bzw. Johnsonbrunnen
- $U = \frac{d_{50}}{d_{10}}$  - Ungleichförmigkeitsgrad eines Erdstoffes
- $U_D$  - dito, des Filtererdstoffes
- $U_d$  - dito, des Erdstoffes vom Grundwasserleiter
- $v = \frac{Q}{F}$  - fiktive Grundwassergeschwindigkeit in einer Stromröhre (Filtergeschwindigkeit)
- $v_f$  - dito, im Filtererdstoff
- $v_g$  - dito, im Erdstoff des Grundwasserleiters
- $v_{f,w}$  - wahre Fließgeschwindigkeit in den Porenkanälen des Filtererdstoffes
- $v_{g,w}$  - dito, in den Porenkanälen des Grundwasserleiters
- $w$  - Maschenweite des Filtergewebes
- $\gamma_r$  - Trockenrohichte eines Erdstoffes
- $\gamma_w$  - Wichte des Wassers
- $\epsilon$  - Porenziffer eines Erdstoffes
- $\epsilon_d$  - dito, bei dichtester Lagerung
- $\epsilon_n$  - dito, bei natürlicher Lagerung
- $\epsilon_o$  - dito, bei lockerster Lagerung
- $\varphi_o$  - Berechnungskennwert bei Bestimmung von  $J_{s,krit}$
- $\varphi_1$  - Koeffizient in Gleichung (6), welcher die Form und Rauigkeit der Körner eines nichtbindigen Erdstoffes berücksichtigt
  - $\varphi_1 = 1$  für sandig-kiesige Erdstoffe
  - $\varphi_1 = 0,35$  bis  $0,40$  für gebrochenes Material (Splitt und Schotter)

|                      |   |
|----------------------|---|
| $\tan \varphi$       | - innerer Reibungswinkel der Skelettfüllung eines Erdstoffes        |
| $\phi$               | - Winkel zwischen Erdschwere und Strömungsrichtung des Grundwassers |
| $\mu^*$              | - reduzierter Reibungsbeiwert für innere Suffosion                  |
| $\nu$                | - kinematische Zähigkeit des Wassers                                |
| $\eta$               | - Sicherheitsgrad   |
| $\eta_{\text{erf}}$  | - erforderlicher Sicherheitsgrad                                    |
| $\eta_{\text{vorh}}$ | - vorhandener Sicherheitsgrad                                       |
| $\eta_{S,G}$         | - geometrischer Sicherheitsgrad gegen Suffosion                     |
| $\eta_{K,G}$         | - dito, gegen Kontakterosion  |
| $\eta_{S,H}$         | - hydraulischer Sicherheitsgrad gegen Suffosion                     |
| $\eta_{K,H}$         | - dito, gegen Kontakterosion  |

### 3.1. Begriffe

Entsprechend dem von Ziemis / 22, 24 / vorgeschlagenen Klassifizierungsschema muß man beim Brunnenbau insbesondere mit folgenden drei Möglichkeiten der örtlichen mechanischen Erdstoffverformung infolge der Durchströmungskräfte rechnen: Suffosion, Erosion und Kolmation.

Bei der Suffosion (Bild 3/1) werden nur die Teilchen der feinen Fraktionen eines ungleich-



förmigen nichtbindigen Erdstoffes oder eines bindigen Erdstoffes mit Ausfallkörnung bzw. Mischbodenstruktur, d. h. der Skelettfüllung, im vorhandenen Porenraum des Skeletts solcher Erdstoffe durch die Grundwasserströmung umgelagert und transportiert. Das tragende Erdstoffskelett wird dabei nicht verändert. Man unterscheidet die innere, äußere und Kontaktsuffosion, wobei beim Brunnenbau insbesondere die letzte Form interessiert.

Bild 3/1  
Schematische Darstellung der inneren Suffosion

Bei der Kontaktsuffosion (Bild 3/2) findet die oben definierte innere Suffosion ihre Fort-

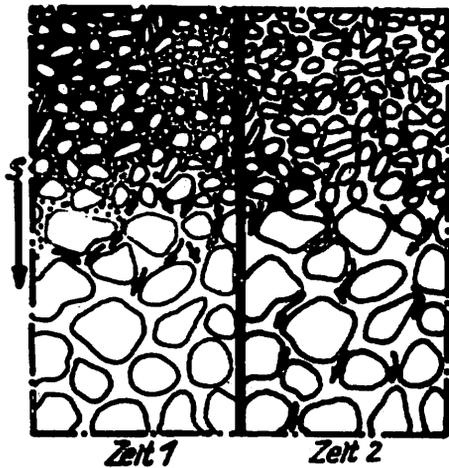


Bild 3/2  
Schematische Darstellung der  
Kontaktsuffosion

setzung an der Kontaktfläche zweier unterschiedlich zusammengesetzter Erdstoffe, d. h. beim Brunnen an der Kontaktfläche zwischen dem Erdstoff des Grundwasserleiters und dem Filtererdstoff. Dabei finden die bewegten Teilchen  $d_g$  des Grundwasserleiters in den Poren des Filtererdstoffes  $D_p$  Platz, und es ergibt sich die Möglichkeit der weiteren inneren Suffosion in diesem "neuen" Filtererdstoff. Die Teilchen  $d_g$  können sich aber auch in den Porenkanälen des Filtererdstoffes festsetzen, d. h. es kann zur "inneren Kolmation" im Filtererdstoff kommen. Dies ist insbesondere dann der Fall, wenn die Schlitzweite  $s$  des Brunnenfilterrohres infolge zu geringer Größe ( $s < d_g$ ) einen Abtransport der Teilchen  $d_g$  aus dem Filtererdstoff verhindert.

Bei der Erosion (Bild 3/3) dagegen werden Teilchen fast aller Fraktionen des Erdstoffes an

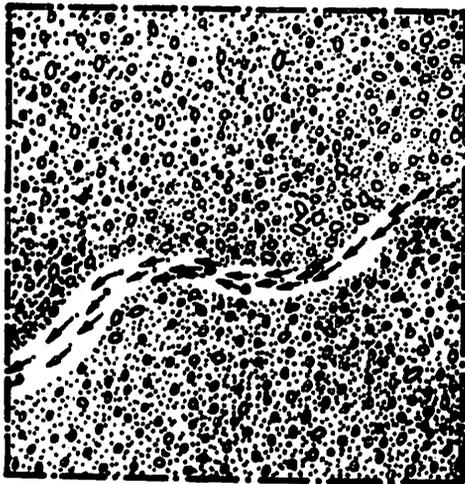


Bild 3/3  
Schematische Darstellung der  
inneren Erosion

seiner freien Oberfläche (äußere Erosion), im Innern des Erdkörpers (innere Erosion) (Bild 3/3) oder an der Kontaktfläche zweier unterschiedlich zusammengesetzter Erdstoffe (Kontakterosion) durch das Oberflächen- oder Grundwasser umlagert und transportiert. Es kommt dadurch zur fortschreitenden Zerstörung der Erdstoffstruktur und schließlich zur umfassenden Verformung des ganzen Erdkörpers. Im Brunnenbau interessiert besonders die Kontakterosion, wobei die innere Erosion des Erdstoffes des Grundwasserleiters an der Kontaktfläche zum Filtererdstoff ihren Anfang nimmt. Wie bei der Kontaktsuffosion werden auch bei der Kontakterosion die bewegten Teilchen des Grundwasserleiters im Filtererdstoff durch innere Suffosion im Filter weitertransportiert oder durch innere Kolmation im Filter abgelagert, sodaß dieser schließlich verstopft

und seine Funktionsfähigkeit mehr oder weniger verliert. Bei größerem Sandanfall im Filterrohr versandet dieses relativ schnell. Im Gegensatz zur Kontaktsuffosion kommt es bei der Kontakterosion zur umfassenden Verformung des Grundwasserleiters, insbesondere zu Setzungen am Brunnen und der Ausspülung großer Sandmengen. Die Kontaktsuffosion ist daher im allgemeinen zulässig und oft sogar erwünscht (Entsandung des Grundwasserleiters) im brunnen-nahen Bereich, während die Kontakterosion durch Anwendung entsprechender Filterregeln unbedingt auszuschließen ist.

Man unterscheidet nach / 24 / die im Bild 3/4 dargestellten Typen der Kontakterosion. Sie unterscheiden sich hinsichtlich der Strömungsrichtung des Grundwassers und der Zuordnung der feineren und gröbercn Erdstoffe. Bei Vertikalbrunnen könnte demnach vor allem die Kontakterosion Typ 3/3 (Bild 3/5) bei horizontaler Brunnenzuströmung und Typ 3/1 im Bereich der Sickerstrecke auftreten.

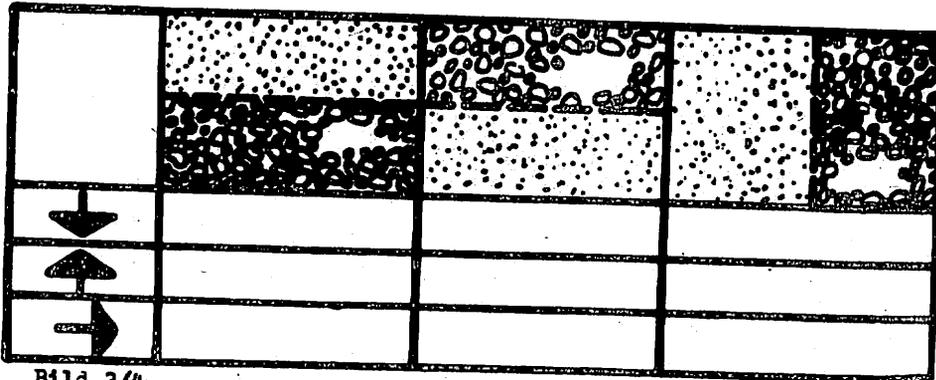


Bild 3/4  
Typen der Kontaktersion nach / 24 /

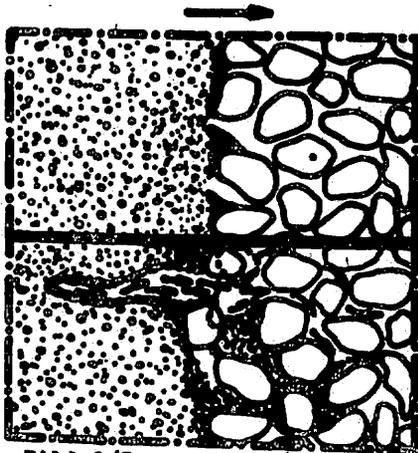


Bild 3/5  
Schematische Darstellung der  
Kontaktersion Typ 3/3

Zeit 1

Zeit 2

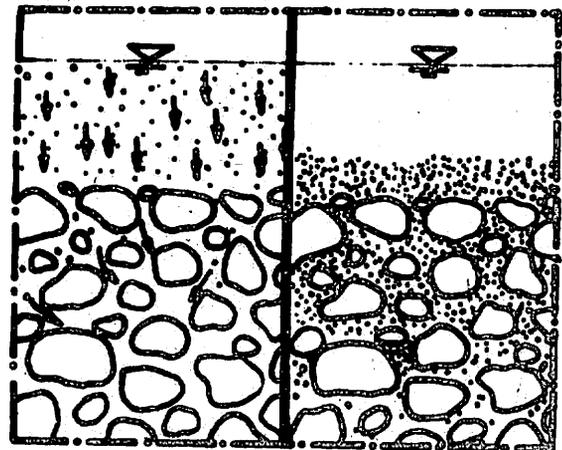


Bild 3/6  
Schematische Darstellung der  
äußeren und inneren Kolmation

Die Kolmation (Bild 3/6) ist in gewissem Sinne die Umkehrung der Suffosion. Dabei werden die suspendierten feinen Teilchen im Oberflächen- (Bild 3/6) oder Grundwasser an der Oberfläche oder im Innern von Erdkörpern oder anderen porösen Medien abgelagert. Man unterscheidet daher die äußere und innere Kolmation, letztere wird von HANSEL / 6 / auch als Inversion bezeichnet. Beim Brunnenbau interessiert insbesondere die innere Kolmation des Filtererdstoffes infolge einer Kontaktsuffosion.

Innere Kolmation des Filtererdstoffes tritt ein, wenn die Strömungskraft im Filter zum Weitertransport der suspendierten Teilchen nicht ausreicht, wenn die relativen Porenkanalminima zu klein sind, um die Teilchen  $d_p$  durchzulassen und wenn eine zu geringe Schlitzweite des Brunnenfilterrohres einen Abtransport der Teilchen aus dem Filtererdstoff zwangsläufig ausschließt. Die innere Kolmation des Filtererdstoffes ist daher durch entsprechende Regeln möglichst zu verhindern, da anderenfalls die Wirkung des Filters nach und nach aufgehoben wird und die Brunnenleistung dementsprechend zurückgeht.

### 3.2. Zur Porengeometrie nichtbindiger Erdstoffe

Die Kenntnis der geometrischen Abmessungen der Porenkanäle im Filtererdstoff ist eine der wichtigsten Grundlagen für die mathematische Formulierung der Gesetzmäßigkeiten für die Kontaktersion, Kontaktsuffosion und inneren Kolmation und somit für die Filterbemessung der Brunnen.

In der Vergangenheit wurde in deutschen und internationalen Schriften vorwiegend das Modell der homodispersen Kugelpackung verwendet (z. B. in 2, 5, 8, 12, 15, 17 u. a. m.). In diesem Fall beträgt der Porendurchmesser  $D_p$  bei praktisch lockerster Lagerung (reguläre 6-er Packung):

$$D_p = 0,4142 \cdot D \quad (3/1)$$

und bei theoretisch dichtester Lagerung (reguläre kubische bzw. hexagonale 12-er Packung):

$$D_p = 0,1547 \cdot D \quad (3/2)$$

Das Modell der homodispersen Kugelpackung entspricht jedoch nur in grober Annäherung den natürlichen Bedingungen der Filtererdstoffe, da diese niemals homodispers, d. h. völlig gleichförmig sind, sondern einen Ungleichförmigkeitsgrad  $U$  in den Grenzen

$$1 \leq U = \frac{D_{60}}{D_{10}} \leq 3 \quad (3/3)$$

aufweisen und da ferner die Kornform erheblich von der Kugelform abweichen kann, insbesondere bei Verwendung von gebrochenen Materialien wie Splitt und Schotter, z. B. für Einkornbetonfilter.

Durch die Arbeiten von ZIESS / 21, 24 / und LEMCKE / 9 / wurden die neuesten Erkenntnisse, insbesondere der sowjetischen Schule / 7, 13, 14 / ausgewertet und ergänzt, sodaß die o. g. Unzulänglichkeiten weitgehend überwunden sind. In der UdSSR werden zur Zeit folgende Gleichungen zur Bestimmung des Porendurchmessers natürlicher nichtbindiger Erdstoffe verwendet:

$$D_p = 0,026 (1 + 0,15 \cdot U) \sqrt{\frac{k}{n}} \quad [ \text{cm} ] \quad \text{nach / 13 /} \quad (3/4)$$

$$D_p = \sqrt{\frac{96 \cdot k \cdot \gamma}{\varepsilon (1,114 \cdot n - 0,114)}} \quad [ \text{cm} ] \quad \text{nach / 7 /} \quad (3/5)$$

$$D_p = 7,12 \sqrt{\frac{\gamma \cdot k}{\varepsilon \cdot n \cdot \beta_1}} \quad [ \text{cm} ] \quad \text{nach / 14 /} \quad (3/6)$$

von Patrâsev

$$D_p = 0,455 \sqrt[6]{U} \cdot \varepsilon \cdot D_{17} \quad [ \text{cm} ] \quad \text{nach / 14 /} \quad (3/7)$$

von Pavâie

Die vorstehende Gleichung (3/7) wurde aus (3/6) entwickelt, indem für den Durchlässigkeitsbeiwert  $k$  die empirische Beziehung von ZAUBERREJ / 20 / verwendet wurde:

$$k = \frac{3,99 \cdot \beta_1}{\gamma} \cdot \sqrt[3]{U} \cdot \frac{n^3}{(1-n)^2} \cdot D_{17}^2 \quad [ \text{cm}^2/\text{s} ] \quad (3/8)$$

Die nach den Gleichungen (3/4) bis (3/7) berechneten Porendurchmesser sind hydraulische Äquivalentgrößen und stellen in diesem Sinne mittlere hydraulisch wirksame Durchmesser der Porenkanäle dar. ZIESS / 24 / hat durch Vergleich dieser hydraulisch mittleren Porendurchmesser mit der Porendurchmesserverteilungslinie, die nach dem von LEMCKE / 9 / verbesserten Verfahren von SILVEIRA / 18 / errechnet wurde, festgestellt, daß die hydraulisch mittleren Porendurchmesser als im geometrischen Sinne maßgebenden Porenkanaldurchmesser (Durchmesser der relativen Querschnittsminima der Porenkanäle) angesehen werden können, sofern die Schichtdicke des betrachteten Erdkörpers größer als 10 cm ist und für den Transport von Erdstoffteilchen im Porenkanal (Suffosion, Erosion) oder die Ablagerung solcher Teilchen (Kolmation) unterschiedliche Korrekturfaktoren (Schlupffaktoren) berücksichtigt werden.

Die Untersuchungen von LEMCKE über die Ermittlung der Porendurchmesserverteilungslinie werden zur Zeit noch weitergeführt. Es steht jedoch fest, daß die nach Gleichung (3/7) ermittelten Porendurchmesser für die Sicherheitsberechnungen zur Kontakterosion genügend genau sind und auf der sicheren Seite liegen. Es ist zu erwarten, daß nach Abschluß der laufenden Forschungen im Jahre 1971 ein noch ökonomischeres und alle Seiten des Problems der Geometrie nichtbindiger Erdstoffe erfassendes mathematisches Modell zur Verfügung stehen wird (Ab-

hängigkeit der Porendurchmesserverteilungslinie von der Lagerungsdichte, Kornform und absoluten Korngröße sowie der freien Weglänge bewegter Teilchen aus dem Grundwasserleiter in den Porenkanälen des Filters von den Erdstoffkennwerten beider Erdstoffe, der Filterdicke und den hydraulischen Randbedingungen).

Gemäß dem derzeitigen theoretisch begründeten und praktisch gesicherten Erkenntnisstand wird daher Gleichung (3/7) für die Berechnung des maßgebenden Porendurchmessers natürlicher nichtbindiger Erdstoffe mit annähernd kugelförmigen Körnern (Sande und Kiese) empfohlen. Nach ZIEMIS / 24 / ist der Porendurchmesser für Erdstoffe mit scharfkantig-eckiger Kornform auf das 1,3-fache zu vergrößern. Für gebrochene Filtermaterialien (Splitt und Schotter) gilt somit:

$$D_p = 0,59 \sqrt[6]{U} \cdot \xi \cdot D_{17} \quad [ \text{cm} ] \quad (3/9)$$

Unter gewissen, nachstehend genannten Voraussetzungen bzw. zulässigen Annahmen kann die Gleichung (3/7) für die hier vorliegende Aufgabenstellung noch bedeutend vereinfacht werden.

1. Der Ungleichförmigkeitsgrad  $U_D$  der Filtermaterialien soll nach ANACKER-RIEMPP / 1 / wegen der Entmischungsgefahr ungleichförmiger Erdstoffe beim freien Fall in Wasser oder in Luft, d. h. also insbesondere beim Bau von Tiefbrunnen, möglichst klein, d. h. etwa  $U_D \approx 1 \div 2$  sein. Nach TGL 22 964 / 26 / sind aber gewisse Prozentsätze an Unter- bzw. Überkorn praktisch unvermeidlich und zugelassen. Es wird daher in dem hier kommentierten Werkstandard WAPnO 1.42.  $1 \leq U_D \leq 3$  gefordert und den weiteren Betrachtungen zugrunde gelegt, (siehe auch Bild 2/1 S. 30).
2. Die praktischen Erfahrungen des Erdbaues zeigen, daß sich gleichförmige Erdstoffe kaum künstlich verdichten lassen. Beim Brunnenbau muß daher mit annähernd lockerster Lagerung der Filterschüttung gerechnet werden (für  $U_D \approx 1$  gilt  $\xi_0 \approx 0,9$ ), da eine künstliche Verdichtung im allgemeinen unmöglich ist. Im günstigsten Falle kann eine Porenziffer von  $0,7 \leq \xi \leq 0,9$  erwartet werden.
3. Es ist zweckmäßig und bei  $1 \leq U_D \leq 3$  auch fast immer möglich, anstelle des Erdstoffkennwertes  $D_{17}$  den mittleren Korndurchmesser  $D_{50}$  einzuführen, wenn angenommen wird, daß die Kornverteilungslinie der Filtererdstoffe zwischen  $D_{10}$  und  $D_{60}$  annähernd geradlinig im semilogarithmischen Koordinatensystem verläuft. Unter dieser Voraussetzung gilt:

$$D_{17} = D_{50} \cdot U_D^{\left(\frac{17-50}{50}\right)} = D_{50} \cdot U_D^{-\frac{2}{3}} = \frac{D_{50}}{\sqrt[3]{U_D^2}} \quad (3/10)$$

Mit diesen drei Voraussetzungen bzw. Annahmen vereinfacht sich Gleichung (3/7) zu

$$D_p = 0,455 \cdot \xi \cdot \frac{\sqrt[6]{U_D}}{\sqrt[3]{U_D^2}} \cdot D_{50} = 0,455 \cdot \xi \cdot \frac{D_{50}}{\sqrt{U}} \quad (3/11)$$

Für  $0,7 \leq \xi \leq 0,9$  bzw. bei  $\xi \approx \xi_0 \approx 0,9$  ergibt sich:

$$D_p = 0,415 \cdot \frac{D_{50}}{\sqrt{U}} \quad (3/12)$$

Die Gleichungen (3/11) und (3/12) sind in der Form

$$\frac{D_p}{D_{50}} = f(U_D, \xi) \quad (3/13)$$

auf Bild 3/7 grafisch dargestellt.

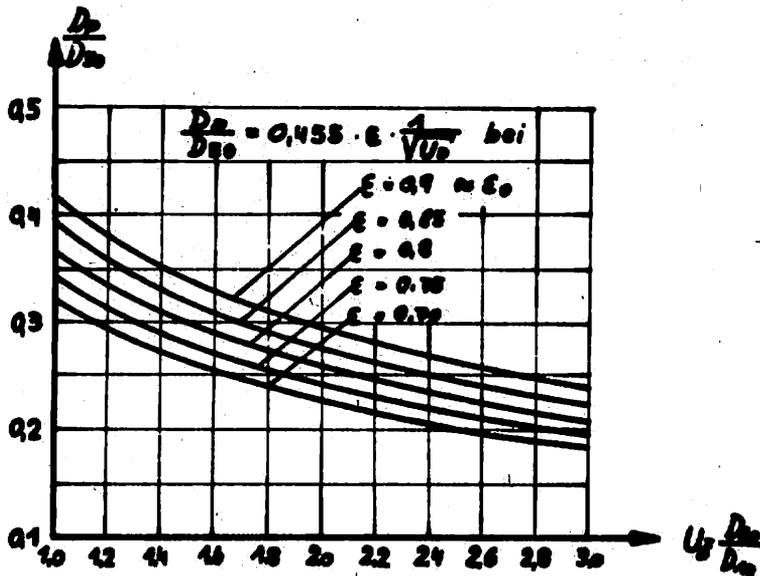


Bild 3/7

Bezogener Porendurchmesser  $D_p/D_{50}$  von Filtersand und Filterkies in Abhängigkeit vom Ungleichförmigkeitsgrad  $U_D = U_{50}/D_{10}$  und der Porenziffer  $\epsilon$ .

Bild 3/7

Sie sind die Grundlage für die Untersuchungen zu den Gesetzmäßigkeiten der inneren Suffosion, Kontakterosion und inneren Kolmation in den folgenden Abschnitten.

### 3.3. Einige Gesetzmäßigkeiten der inneren Suffosion

Die Gesetzmäßigkeiten der inneren Suffosion, äußeren Suffosion und Kontaktsuffosion sind im WAPRO 4.04. Blatt 2 / 23 / von ZIEMS ausführlich dargelegt worden. Neueste Erkenntnisse der sowjetischen Forschung enthält darüberhinaus / 14 /. Die wichtigsten Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen.

Bei Suffosionsberechnungen sind im allgemeinen zwei Sicherheitsnachweise zu führen.

#### 3.3.1. Nachweis der geometrischen Suffosionssicherheit $\eta_{S.G.}$

$$\eta_{S.G.} = \frac{d_{\min}}{d_s} \geq 1,5 \quad (3/14)$$

mit:

$$d_s = F_s \cdot d_p \quad (3/15)$$

als dem größten suffosionsgefährdeten Korn des Erdstoffes, dem erforderlichen Schlupffaktor für das Loslösen feinsten Teilchen der Skelettfüllung im Erstoffskelett:

$$F_s \approx 0,6 \quad (3/16)$$

und dem Porendurchmesser  $d_p$  des Erdstoffes. Für stetige Kornverteilungslinien ohne Ausfallkörnung gilt für  $d_p$  die Gleichung (3/7)

$$d_p = 0,455 \cdot \sqrt[6]{U_d} \cdot \epsilon \cdot d_{17}$$

für Erdstoffe mit Ausfallkörnung gilt jedoch folgende Beziehung:

$$d_{p,Sk} \approx 0,16 \cdot d_{SK,r} \quad (3/17)$$

wobei der Porendurchmesser des Erdstoffskeletts  $d_{p,SK}$  mit Hilfe des rechnerischen Korndurchmessers des Skeletts  $d_{SK,r}$  gemäß dem im WAFRO 4.04. Blatt 2 / 23 / näher beschriebenen Verfahren von LUBOČKOV / 11 / berechnet werden muß.

Von besonderem Interesse sind die Regeln 4,5 und 7 des o. g. Werkstandards. Danach sind ungleichförmige Erdstoffe mit stetigen Kornverteilungslinien (eine stetige Kornverteilungslinie im semilogarithmischen Koordinatensystem ist dadurch charakterisiert, daß keine plötzlichen Anstiegsänderungen auftreten) ohne Ausfallkörnung bei

$$U \approx 8 (+ 10) \quad (3/18)$$

praktisch sicher gegen innere Suffosion, wenn mindestens mitteldichte Lagerung mit

$$0,3 \leq D_{\epsilon} = \frac{\epsilon_0 - \epsilon_n}{\epsilon_0 - \epsilon_d} \approx 0,6 \quad (3/19)$$

garantiert ist. Bei einem Ungleichförmigkeitsgrad

$$U > 8 \quad (3/20)$$

sind diese Erdstoffe mit  $\eta_{S.G} = 1$  sicher gegen innere Suffosion, wenn

$$d_{min} \approx 0,27 \cdot \sqrt[6]{U} \cdot \epsilon \cdot d_{17} \quad (3/21)$$

ist. Regel 7 des Werkstandards besagt darüberhinaus, daß ungleichförmige Erdstoffe mit mitteldichter Lagerung gemäß Gleichung (3/19) und mit stetig gekrümmten Kornverteilungslinien, die vollständig in den Grenzbereichen des Bildes 3/8 verlaufen, sicher gegen innere Suffosion sind.

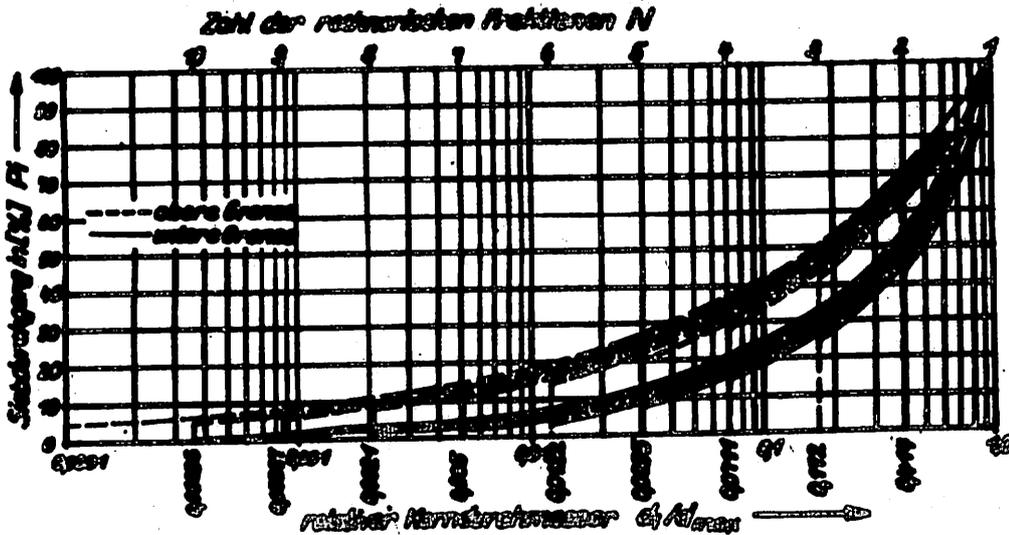


Bild 3/8

Grenzkornverteilungslinien für suffosionssichere nichtbindige Erdstoffe nach LUBOČKOV / 11 /

In der Natur kommen daher wenig suffosionsgefährdete Erdstoffe vor. Für diese ist gemäß den Gleichungen (3/14), (3/15), (3/16) und (3/17), die zusammengefaßt folgende Bedingungs-gleichung ergeben:

$$\eta_{S.G} = \frac{d_{min}}{0,1 \cdot d_{SK,r}} \approx 1,5 \quad (3/22)$$

die Sicherheit gegen innere Suffosion nachweisbar. Der Kennwert  $d_{SK,r}$  kann nach den im o. g. Werkstandard ausführlich beschriebenen grafischen oder analytischen Verfahren von LUBOČKOV / 11 / bestimmt werden.

### 3.3.2. Nachweis der hydraulischen Suffosionssicherheit $\eta_{S,H}$

Wird nachgewiesen, daß ein Erdstoff (geometrisch) suffosionsgefährdet ist ( $\eta_{S,G} < 1,5$ ), so heißt dies noch nicht zwingend, daß die Suffosion auch tatsächlich erfolgt. Daher wird in diesem Falle noch der Nachweis der hydraulischen Suffosionssicherheit gefordert

$$\eta_{S,H} = \frac{J_{S,krit}}{J_{vorh.}} \geq 2 \quad (3/23)$$

Für suffosionsgefährdete Erdstoffe ohne Ausfallkörnung kann das kritische Gefälle für den Beginn der Suffosion  $J_{S,krit}$  wie folgt berechnet werden:

$$J_{S,krit} = \varphi_0 \cdot d_s \cdot \sqrt{\frac{n \cdot \rho}{\gamma \cdot k}} \quad [ \text{alle Kennwerte in cm} ] \quad (3/24)$$

mit

$$\varphi_0 = 0,6 \left( \frac{\gamma_{tr}}{\gamma_w} - 1 \right) \cdot \mu_w \sin \left( 30^\circ + \frac{\rho}{\rho_w} \right) \quad (3/25)$$

und

$$\mu_w = 0,82 - 1,8 \cdot n + 0,0062 (U - 5) \quad (3/26)$$

(siehe hierzu ein Berechnungsbeispiel im Abschnitt 3.6.).

Für suffosionsgefährdete Erdstoffe mit Ausfallkörnung ist zur Zeit nur die grobe Näherungslösung von ISTOMINA / 7 / als brauchbar zu bezeichnen:

$$J_{S,krit} = J_1 + J_2 \quad (3/27)$$

mit

$$J_1 = \frac{n_F \cdot k_F}{n_E \cdot k_E} \quad (3/28)$$

und

$$J_2 = f \left( \frac{d_{10,SK}}{d_{10,F} \cdot \tan \varphi_F} \right) \quad \text{gemäß Bild 3/9} \quad (3/29)$$

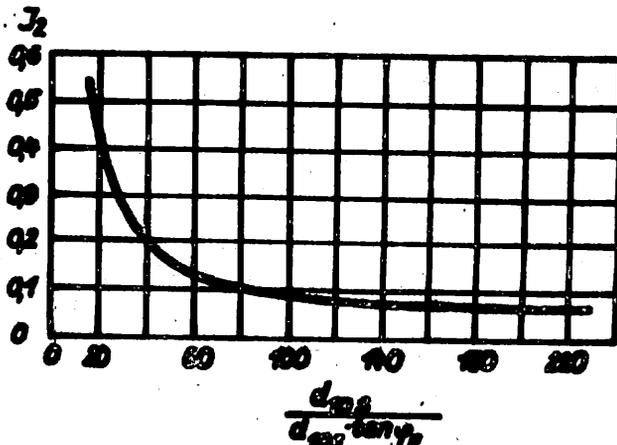


Bild 3/9

Dabei ist zu beachten, daß ISTOMINA die Grenze zwischen Erdstoffskelett und Skelettfüllung recht willkürlich mit  $d = 1$  mm festlegte. Daher sind bei Abweichungen von dieser Festlegung ISTOMINAS unbedingt Laborversuche zur Bestimmung von  $J_{S,krit}$  anzuraten.

### 3.4. Zur mechanischen Kolmation nichtbindiger Erdstoffe

Wie in Abschnitt 3.1. erläutert wurde, ist die innere Kolmation der Filtererdstoffe durch die so oft unvermeidliche und meistens sogar erwünschte Kontaktsuffosion unbedingt zu verhindern. Um das zu erreichen, sind zwei Bedingungen einzuhalten:

1. Die Schlitzweite  $s$  (h oder w) des Brunnenfilterrohres oder Maschengewebes muß größer als das maximale Suffosionskorn  $d_g$  des Erdstoffes des Grundwasserleiters sein, welches die Poren des Filtererdstoffes  $D_p$  passieren kann (weiteres hierzu im Abschnitt 3.6.).
2. Der Porendurchmesser  $D_p$  des Filtererdstoffes muß größer als das maximale Suffosionskorn  $d_g$  sein, wobei ein unterschiedlicher Schlupffaktor  $F_g$  zu berücksichtigen ist - dergestalt, daß ein Weitertransport der Teilchen  $d_g$  in den Porenkanälen mit dem relativen Querschnittsminimum  $D_p$  tatsächlich erfolgen kann.

Nach den Forschungsergebnissen von PATRASEV / 14 / soll gelten:

$$D_p \approx \frac{d_g}{F_g} = 1,1 a^* \cdot d_g \quad (3/30)$$

wobei der Faktor 1,1 die Dicke der gebundenen Wasserhülle am Korn  $d_g$  repräsentiert und der Kennwert  $a^*$  in Abhängigkeit von der absoluten Korngröße  $d_g$  nach folgender Tabelle bestimmt werden kann:

Tabelle 3/1:

| Teilchengröße $d_g$ [mm]        | Kennwert $a^*$ | $F_g$ |
|---------------------------------|----------------|-------|
| 0,01 $\approx d_g \approx$ 0,05 | 4              | 0,23  |
| 0,05 $\approx d_g \approx$ 0,25 | 3              | 0,3   |
| 0,25 $\approx d_g \approx$ 0,50 | 2,5            | 0,36  |

Durch Umformung der Gleichung (3/30) erhält man:

$$\frac{D_p}{D_{50}} = \frac{1,1 a^* \cdot d_g}{D_{50}} \quad (3/31)$$

Führt man auf der linken Seite die ebenfalls umgeformte Gleichung (3/11) ein:

$$\frac{D_p}{D_{50}} = \frac{0,455 \cdot \epsilon}{\sqrt{U_D}} \quad \text{gültig für } 1 \approx U_D \approx 3 \quad (3/32)$$

so erhält man:

$$D_{50} = \frac{2,5 \cdot a^* \cdot d_g \cdot \sqrt{U_D}}{\epsilon} \quad \text{gültig für } 0,7 \approx \epsilon \approx 0,9 \quad (3/33)$$

bzw. für lockerste Lagerung des Filtererdstoffes ( $\epsilon = 0,91$ )

$$D_{50} = 2,65 \cdot a^* \cdot d_g \cdot \sqrt{U_D} \quad (3/34)$$

Gleichung (3/33) wurde in Regel 7 des erarbeiteten WAPRO 1.42. Brunnenberechnung als untere Grenze für den Korndurchmesser  $D_{50}$  des Filtererdstoffes verwendet. Damit werden die geometrischen Voraussetzungen geschaffen, daß die durch Kontaktsuffosion ausgewaschenen Teilchen  $d_g$  des Grundwasserleiters die Porenkanäle des Filters auch tatsächlich passieren können.

Dennoch ist die Nichtkolmatierbarkeit des Filtererdstoffes durch Einhaltung von Regel 7 des Werkstandards noch nicht eindeutig für alle praktischen Fälle bestimmt. Erst ein Nachweis darüber, daß die Strömungskräfte in den Porenkanälen des Filtererdstoffes mindestens die

gleiche Größe wie diejenigen in den Porenkanälen des Grundwasserleiters haben, kann endgültige Klarheit verschaffen. Da genaue Aussagen über die Strömungskräfte in den Porenkanälen von Erdstoffen zur Zeit recht kompliziert sind, wird nachstehend durch Vergleich der wahren Grundwassergeschwindigkeiten in den Porenkanälen des Grundwasserleiters  $v_{g,w}$  und des Filterstoffes  $v_{f,w}$  ein angenäherter Nachweis geführt.

Zunächst kann festgestellt werden, daß die fiktive Grundwassergeschwindigkeit in einer Stromröhre

$$v = \frac{v_g}{R} \quad (3/35)$$

infolge der ständigen Abnahme der Querschnittsfläche  $F_R$  der betrachteten Stromröhre durch die räumliche Zuströmung zum Brunnen, bei abnehmendem Abstand zum Brunnenfilterrohr nach einer linearen Funktion zunimmt und ihr Maximum im Filterstoff erreicht. Dies bedeutet, daß

$$v_f > v_g \quad (3/36)$$

ist. Die wahren Grundwassergeschwindigkeiten in den Porenkanälen betragen näherungsweise:

$$v_{f,w} = \frac{v_f}{n_f} \quad \text{und} \quad v_{g,w} = \frac{v_g}{n_g} \quad (3/37)$$

Da der Porenanteil  $n_g$  im Erdstoff des Grundwasserleiters kaum kleiner, in vielen Fällen gleich und oft sogar größer als der Porenanteil  $n_f$  im Filtererdstoff ist, kann man schreiben:

$$n_g \approx n_f \quad (3/38)$$

Aus den Gleichungen (3/36), (3/37) und (3/38) ergibt sich eindeutig:

$$v_{f,w} > v_{g,w} \quad (3/39)$$

Diese Gleichung bringt zum Ausdruck, daß die durch Suffosion im Grundwasserleiter gelösten Teilchen  $d_g$  bei Einhaltung der Regel 7 des Werkstandards mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit auch im Filter weitertransportiert werden und dort nicht kolmatieren. Natürlich werden die toten Winkel im Porensystem des Filtererdstoffes durch Teilchen  $d_i \leq d_g$  mehr oder weniger ausgefüllt, die hydraulisch wirksamen Anteile der Porenkanäle bleiben aber offen, und das ist das Entscheidende.

### 3.5. Einige Gesetzmäßigkeiten der Kontakterosion

Bei der Bemessung von Brunnenfiltern wurden in der Vergangenheit vor allem die Filterregeln von Sichert /17/:

$$\frac{D}{d} \leq 4, \quad \text{gültig für } U_D = U_d = 1, \quad (3/40)$$

und von Terzaghi /19/:

$$\frac{D_{15}}{d_{85}} \leq 4 \text{ (} \div 5 \text{)}, \quad \text{gültig für } U_d \leq 2 \div 3, \quad U_D \leq 2 \div 3 \quad (3/41)$$

angewendet. ZIEMS hat in / 24 / nachgewiesen, daß diese Regeln unter den für sie geltenden Randbedingungen die geometrische Sicherheit gegen die Kontakterosion aller Typen nach Bild 3/4 repräsentieren. Ihr Anwendungsbereich ist jedoch sehr begrenzt.

In / 24. / wurde eine auf theoretischen Analysen und Ergebnissen systematischer Laborversuche von Čiřtin / 3 / und Ziems / 21 / aufbauende allgemeine Regel für die geometrische Sicherheit gegen Kontakterosion aller Typen formuliert, die für  $1 \leq U_d \leq 20$  und  $1 \leq U_D \leq 20$

gültig ist, und daher die begrenzte Anwendbarkeit der älteren Filterregeln überwindet:

$$\eta_{K,G,vorh} = \frac{d_{\text{maß}}}{F \cdot D_{p,\text{maß}}} \stackrel{!}{=} \eta_{K,G,erf} = 1,5 \quad (3/42)$$

Die Erdstoffparameter  $d_{\text{maß}}$  des Grundwasserleiters und  $D_{p,\text{maß}}$  des Filters hängen bei kugelförmig-abgerundeter Kornform vom Ungleichförmigkeitsgrad  $U_d$  und  $U_D$  sowie der Lagerungsdichte  $D_E$  beider Erdstoffe ab. Wird eine praktisch leicht erreichbare, wahrscheinliche Lagerungsdichte in folgender Form als konstant vorausgesetzt:

$$D_{E,\text{maß}} = \begin{cases} 0 & \text{für } U \begin{matrix} < 2 \\ \geq 10 \end{matrix} \\ 0,5 & \text{für } 2 \leq U \leq 10 \end{cases} \quad (3/43)$$

so lassen sich die vorgenannten Erdstoffkennwerte  $d_{\text{maß}}$  und  $D_{p,\text{maß}}$  in Abhängigkeit vom Ungleichförmigkeitsgrad der betreffenden Erdstoffe darstellen:

$$\frac{d_{\text{maß}}}{d_{50}} = f_1(U_d) \quad \text{und} \quad (3/44)$$

$$\frac{D_{p,\text{maß}}}{D_{50}} = f_2(U_D) \quad (3/45)$$

Der Einflußfaktor  $F$  in Gleichung (3/42) berücksichtigt bei gleichbleibender kugelförmig-abgerundeter Kornform beider Erdstoffe insbesondere das Schlupfmaß  $F_S$  zwischen  $d$  und  $D_p$  sowie den Gewölbebildungseffekt  $F_G$  der Körner  $d_{\text{maß}}$  über den Poren  $D_{p,\text{maß}}$ . Lemecke / 10 / bezeichnet den Einflußfaktor  $F$  als Durchgangsfaktor  $F_D$  und stellt fest, daß immer  $F_S < F_G$  ist. Da getrennte Zahlenangaben für  $F_S$  und  $F_G$  noch nicht eindeutig durch Versuche belegt sind, wird vorläufig mit dem summarischen Faktor  $F$  weiter zu arbeiten sein:

$$F = F_D = F_S \cdot F_G \quad (3/46)$$

Aus Laborversuchen von Ziems / 24 / ergab sich  $F$  für Sande und Kiese zu:

$$F \approx 0,4 \quad (3/47)$$

Die Angaben in der internationalen Literatur liegen im Bereich:

$$0,33 \leq F < 0,5 \div 0,55 \quad (3/48)$$

Für absolute Korngrößen  $d_{50} < 1$  mm verringert sich der Zahlenwert für  $F$  relativ schnell, sodaß Gleichung (3/47) für die vorliegende Aufgabenstellung als genügend genau und für sehr feinkörnige Grundwasserleiter darüberhinaus als auf der sicheren Seite liegend verwendet werden kann.

Die Einflußfunktion  $f_2(U_D)$  gemäß Gleichung (3/45) kann mit Gleichung (3/12) für  $1 \leq U_D \leq 3$  als bekannt vorausgesetzt werden. Die Einflußfunktion  $f_1(U_d)$  gemäß Gleichung (3/44) wurde durch Laborversuche von Čiřtin und Ziems für  $1 \leq U_d \leq 20$  ermittelt. Gleichung (3/42) läßt sich somit wie folgt darstellen:

$$\frac{f_1(U_d)}{1,5 \cdot F \cdot f_2(U_D)} \stackrel{!}{=} \frac{D_{50}}{d_{50}} \quad (3/49)$$

und in abgekürzter Schreibweise:

$$A_{50,sul} \stackrel{!}{=} A_{50,vorh} \quad (3/50)$$

Das zulässige Abstandsverhältnis  $A_{50,zul}$  wurde in Regel 7 des Werkstandards für die Randbedingungen:

- a)  $1 \leq U_D \leq 3$
- b)  $1 \leq U_d \leq 20$
- c) Kornform kugelähnlich-abgerundet für den Filtererdstoff
- d) Kornform für den Erdstoff des Grundwasserleiters beliebig
- e) Lagerungsdichten gemäß Gleichung (3/43)

grafisch dargestellt. Damit läßt sich die geometrische Sicherheit gegen Kontakterosion aller Typen in der Form

$$D_{50} \leq A_{50,zul} \cdot d_{50} \quad (3/51)$$

leicht berechnen.

Ein Vergleich dieses Entwurfsdiagramms für Brunnenfilter mit der Regel von Terzaghi nach Gleichung (3/41) ergibt folgendes Bild:

Tabelle 3/2:

| $U_D \backslash U_d$ | 1                 | 2                   | 3                   | 10                  | 20                 | $A_{50,zul}$ nach                 |
|----------------------|-------------------|---------------------|---------------------|---------------------|--------------------|-----------------------------------|
| 1                    | $\frac{4}{4}$     | $\frac{6,4}{6,7}$   | $\frac{8,5}{7,5}$   | $\frac{12,0}{4,6}$  | $\frac{100}{2,8}$  | Terzaghi<br>Gleichung (3/41)      |
| 2                    | $\frac{6,4}{6,6}$ | $\frac{10,5}{10,1}$ | $\frac{12,5}{12,0}$ | $\frac{31,0}{10,8}$ | $\frac{162}{7,5}$  | -----                             |
| 3                    | $\frac{8,5}{8,6}$ | $\frac{13,5}{12,0}$ | $\frac{18,0}{14,0}$ | $\frac{41,0}{14,2}$ | $\frac{225}{10,4}$ | Čiřtin / Ziem<br>Gleichung (3/51) |

Übereinstimmende Ergebnisse liegen nur im schraffierten Bereich der Tabelle 3/2 vor. Demnach kann die Filterregel von Terzaghi nur für:

$$U_d = 1 \quad \text{und} \quad U_D \cong 1 \quad \text{sowie}$$

$$U_d \cong 2,5 \quad \text{und} \quad U_D \cong 2,5$$

angewendet werden. Diese Schlußfolgerung bestätigt die leider in der Praxis oft übersehene Einschränkung Terzaghis, daß seine Regel nur für  $U_D \leq 2,5$  (+ 3) und etwa parallele Siebli-nien im semilogarithmischen Koordinatensystem gültig ist. Von Ziem / 24 / wurde nachgewie-sen, daß keine bekannte Filterregel, welche die geometrische Sicherheit gegen Kontaktero-sion zum Inhalt hat, im Widerspruch zum Entwurfsdiagramm der Regel 7 des Werkstandards steht, sofern man die einschränkenden Randbedingungen dieser älteren Regeln beachtet. Das neue Entwurfsdiagramm berücksichtigt die modernsten internationalen Forschungsergebnisse und erlaubt einen sicheren und ökonomischen Filterentwurf.

Bezogen auf den Brunnenbau ist jedoch nur die Kontakterosion Typ 1/3 (siehe Bild 3/4) vom Grundwassergefälle, d. h. von den hydraulischen Randbedingungen unabhängig, während für die Kontakterosion der Typen 2/3 und 3/3 eine Abhängigkeit vom Gefälle und der absoluten Korngröße  $d_{50}$  des Grundwasserleiters existieren muß. Analog zur Suffosion (Gleichungen 3/14 und 3/23) kann man daher neben der geometrischen Sicherheit gegen Kontakterosion (siehe Gleichung 3/42 und 3/51) auch eine hydraulische Sicherheit gegen Kontakterosion wie folgt definieren:

$$\eta_{K,H,vorh} = \frac{J_{K,krit}}{J_{vorh}} \leq \eta_{K,H,erf} \quad (3/53)$$

Der erforderliche Sicherheitsgrad sollte

$$\eta_{K,H,erf} \approx 1,5 \quad (3/54)$$

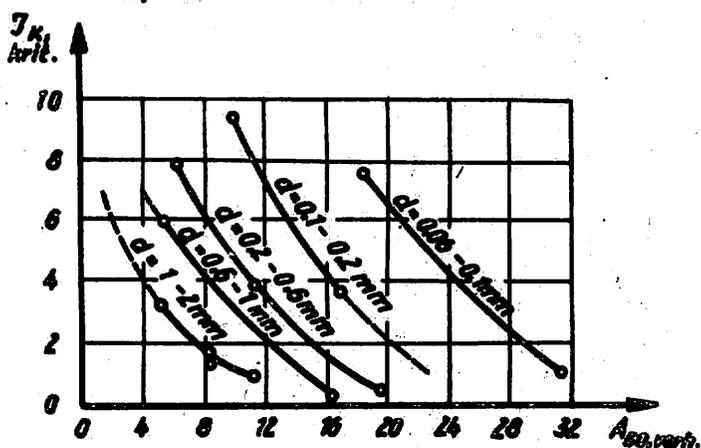
betragen. Das kritische Grundwassergefälle für die Kontakterosion Typ 3/3 ist vor allem vom Abstandsverhältnis  $A_{50,vorh}$  und von der absoluten Korngröße  $d_{50}$  abhängig:

$$J_{K,krit} = f(A_{50}; d_{50}) \quad (3/55)$$

In den Jahren 1957 und 1968 haben Zweck/Davidenkoff / 25 / und Davidenkoff / 4 / diesbezügliche erste Forschungsergebnisse veröffentlicht. Sie verwendeten in ihren Versuchen jedoch nur gleichförmige Sande und Kiese als Basis- und Filtererdstoff mit  $U_d \approx 1 + 2$  und  $U_D \approx 1 + 2$ . Die Ergebnisse sind daher schon aus diesem Grunde nur sehr beschränkt anwendbar, da meistens  $U_d > 2$  ist. Druckpulsationen wurden nicht in ihren quantitativen Auswirkungen untersucht. Bei Auswertung der Versuchsergebnisse wurde vorausgesetzt, daß der Basiserdstoff homogen ist, keine bevorzugten Sickerwege auftreten und stationäre Strömungsbedingungen vorliegen. In zwei Diagrammen wurde

a) der Moment der ersten Bewegung einzelner Körner an der Kontaktfläche (Bild 3/10) mit:

$$J_{K,krit} = f(A_{50}; d_{50}) \quad (3/56)$$



Versuchsergebnisse von Davidenkoff / 4 / für die Kontakterosion Typ 3/3 mit

$$J_{K,krit} = f(A_{50}; d_{50})$$

Bild 3/10.

b) der Moment der ersten beobachteten Setzung des Erdkörpers am Brunnenrand, bei dem schon eine gewisse Eindringung (vergleiche Bild 3/5) des Basiserdstoffes in die Poren des Filtererdstoffes stattgefunden hatte (Bild 3/11) mit:

$$J_{K,Setzung} = f(A_{50}; d_{50}) \quad (3/57)$$

fixiert. Für die Praxis empfiehlt Davidenkoff das Bemessungsdiagramm auf Bild 3/12 mit:

$$A_{50,zul} = f(d_{50}), \quad (3/58)$$

welches aus Bild 3/10 und 3/11 für

$$J_{vorh,max} = ? \quad (3/59)$$

abgeleitet wurde.

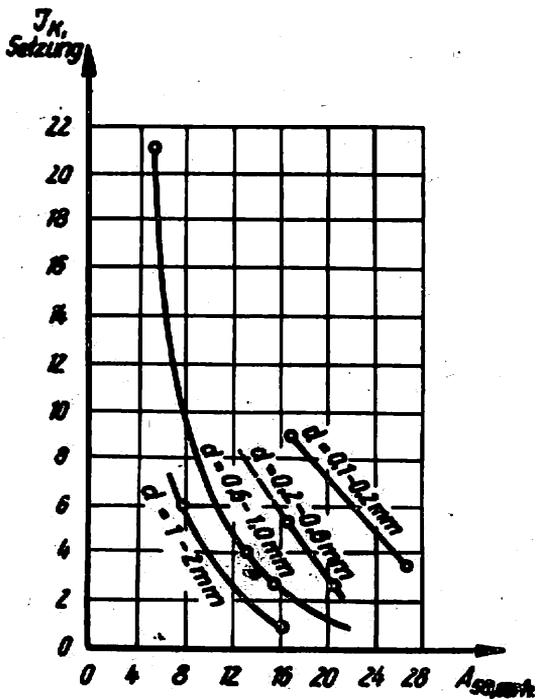


Bild 3/11

Versuchsergebnisse von Davidenkoff / 4 / für die Kontakterosion Typ 3/3 mit

$$J_{K,Setzung} = f(A_{50}, d_{50})$$

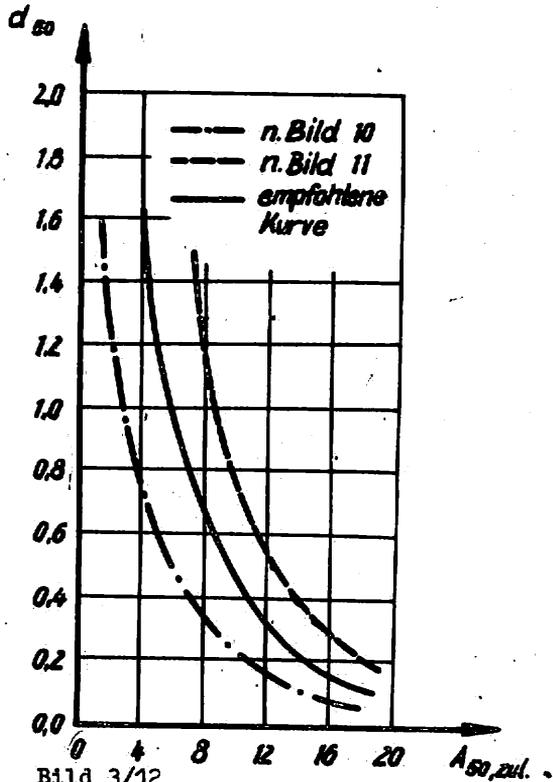


Bild 3/12

Bemessungsdiagramm nach Davidenkoff / 4 / für die Kontakterosion Typ 3/3

$$A_{50,zul} = f(d_{50})$$

gültig für:

- |                           |                                    |
|---------------------------|------------------------------------|
| 1. $J_{vorh,max} \leq 7$  | 2. $0,06 \leq d \leq 2 \text{ mm}$ |
| 3. $U_d \approx 1 \div 2$ | 4. $U_D \approx 1 \div 2$          |
| 5. stationäre Strömung    | 6. pulsationsfreier Brunnenbetrieb |

Wir können in Anlehnung an die Versuchsergebnisse von Ziems / 24 / für die Kontakterosion Typ 2/2, die ebenfalls nur für pulsationsfreien Betrieb des Filters gültig sind, den Vorschlag von Davidenkoff (Bild 3/12) vorläufig nicht akzeptieren. Brunnen werden fast immer mit veränderlicher Förderleistung betrieben, sodaß mit dem Auftreten von Druckpulsationen an der Kontaktfläche Grundwasserleiter/Filter zu rechnen ist. Daher muß selbst bei  $J_{vorh} < J_{K,Setzung}$ , aber entsprechend langer Betriebsdauer mit einer umfassenden Erdkörperverformung in Brunnennähe durch Kontakterosion gerechnet werden, und eine innere Kolmation des Filters ist dann wohl kaum ganz vermeidbar.

Es könnte daher allenfalls die strich-punktierte Kurve auf Bild 3/12 Verwendung finden. Wegen der Randbedingungen  $U_d \approx 1 \div 2$  und  $0,06 \leq d \leq 2 \text{ mm}$  ist das Brunnendiagramm darüber hinaus jedoch nur von geringem praktischem Interesse. Aus allen diesen Gründen können die Diagramme auf den Bildern 3/10 und 3/11 nicht oder nur für sehr kurzlebige Brunnen, z. B. für zeitweilige Grundwasserabsenkungen, verwendet werden.

Der Empfehlung von Ziems in / 24 /:

"Für die Kontakterosion Typ 3/3 und 2/3 die geometrisch sicheren Abstandsverhältnisse" gemäß Gleichung (3/51) zu verwenden,

muß daher vorläufig zugestimmt werden. Weitere Forschungen werden erst zeigen müssen, ob die theoretisch möglichen Erleichterungen gegenüber der Kontakterosion Typ 1/1 auch praktisch verwirklicht werden können.

In diesem Zusammenhang ist darauf hinzuweisen, daß der erforderliche Sicherheitsgrad  $\eta_{K,G \text{ erf}} = 1,5$  in Gleichung (3/42) für Pulsationsbrunnen unbedingt erforderlich ist, da sich der Durchgangsfaktor gemäß Gleichung (3/46) beim Pulsationsbetrieb verringert. Unter Umständen kann der Gewölbebildungseffekt, ausgedrückt durch  $F_G$  in Gleichung (3/46), gänzlich aufgehoben werden ( $F_G \approx 1$ ), sodaß nur der Schlupffaktor  $F_s$  gemäß Gleichung (3/16) erhalten bleibt. Das bedeutet, daß beim Pulsationsbetrieb ungünstigstenfalls nur ein Sicherheitsgrad von etwa  $\eta_{K,G, \text{ vorh}} \approx 1$  vorhanden ist. Die obere Grenze für den Korndurchmesser  $D_{50}$  des Filtererdstoffes in Regel 7 des Standards muß daher sehr streng eingehalten werden.

### 3.6. Zur Bemessung der Filterrohrschlitzweiten bzw. der Maschenöffnungen des Filtergewebes

#### 3.6.1. Normalfall bei Anwendung von Filterschüttungen

Die Schlitzweite  $s$  des Langlochfilterrohres, die lichte Höhe  $h$  des Schlitzbrückenfilterrohres oder die Maschenweite  $w$  des Filtergewebes müssen in diesem Normalfall so bemessen werden, daß folgende zwei Forderungen erfüllt werden.

1. Das maßgebende Feinstkorn  $D_{\text{maßg}}$  des Filtererdstoffes darf nicht durch die Öffnungen  $s$ ,  $h$  oder  $w$  fallen bzw. sich in diesen Öffnungen verklemmen, damit die ohnehin geringe Dicke des Filters nicht unzulässig verkleinert wird und die Öffnungen im Filterrohr bzw. im Maschengewebe nicht verstopfen, was zu einer Verringerung der Brunnenleistung führen würde. Diese Forderung führt zu einer oberen Grenze der Schlitzweite:

$$s \leq D_{\text{maßg}} \quad (3/60)$$

2. Das Korn des Grundwasserleiters  $d_s$ , welches die Poren des Filters  $D_p$  passieren kann, muß auch durch die Öffnungen  $s$ ,  $h$  oder  $w$  durchgespült werden können, damit das Filtermaterial nicht zwangsläufig kolmatiert - erste Bedingung für die Nichtkolmatierbarkeit des Filters. (Zur zweiten Bedingung für die Nichtkolmatierbarkeit des Filtererdstoffes siehe Abschnitt 4. Gleichung (3/33) bzw. (3/34).

Diese Forderung führt zu einer unteren Grenze der Schlitzweite:

$$s \geq d_s = f(D_p) \quad (3/61)$$

Die Bemessungsgleichungen (3/60) und (3/61) werden durch folgende Abbildung verdeutlicht:

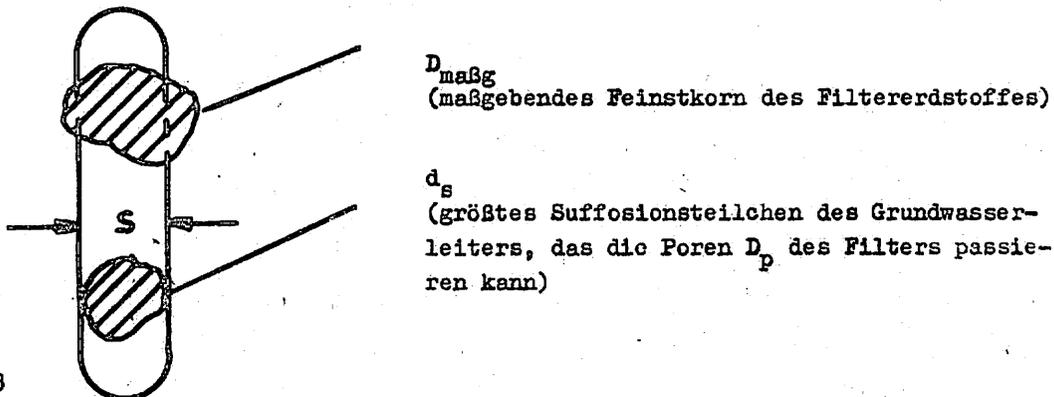


Bild 3/13

Beziehungen zwischen  $s$ ,  $d_s$  und  $D_{\text{maßg}}$

Gleichung (3/60) für die obere Grenze der Schlitzweite kann wie folgt präzisiert werden. Als Feinstkorn  $D_{\text{maßg}}$  soll die untere Körnungsgrenze nach TGL 22 964 angesehen werden. Danach ist aber bei Sorte A 10 % Unterkorn zulässig. Daher gilt als maßgebendes Feinstkorn

in diesem Sinne:

$$D_{\text{maß}} = D_{10} \text{ bzw. } D_{10} = D^* \quad (3/62)$$

mit  $D^*$  - in der TGL 22 964 als unterer Grenzwert genannter Körnungsdurchmesser eines Filterkieses bzw. -sand

Als Sicherheitsfaktor gegen Verkleben dieses Kornes wird  $\eta = 1,1$  für ausreichend erachtet. Die 1. Forderung wird daher erfüllt, wenn:

$$1,1 \cdot s \leq D_{10} \quad (3/63)$$

ist. Zweckmäßigerweise ist Gleichung (3/63) auf  $D_{50}$  zu beziehen. Für gerade Kornverteilungslinien zwischen  $D_{10}$  und  $D_{60}$  im semilogarithmischen Koordinatensystem gilt:

$$D_{10} = D_{50} \cdot U_D^{\frac{(10-50)}{50}} = D_{50} \cdot U_D^{-0,8} = D^* \quad (3/64)$$

und Gleichung (3/63) kann unter dieser in der Filterpraxis fast immer erfüllten Voraussetzung wie folgt geschrieben werden:

$$s \leq \frac{D_{50}}{1,1 \cdot U_D^{+0,8}} \quad \text{bzw.} \quad s \leq \frac{D^*}{1,1} \quad (3/65)$$

(siehe WAFRO 1.42./3, Regel 2, obere Grenze).

Setzt man vereinfachend  $U_D \approx 2$ , ergibt sich:

$$s \approx \frac{D_{50}}{2} \quad (3/66)$$

(siehe WAFRO 1.42./3, Regel 1, obere Grenze).

Gleichung (3/66) ist für Vorbemessungen gut geeignet.

Gleichung (3/61) für die untere Grenze der Schlitzweite kann unter Benutzung von Gleichung (3/11) für den maßgebenden Porendurchmesser  $D_p$  des Filterstoffes und unter Beachtung der Gleichung (3/16) für den maximalen Schlupffaktor  $F_s$  wie folgt präzisiert werden:

$$s \approx d_s = 0,6 \cdot D_p = 0,6 \cdot 0,455 \cdot \epsilon \cdot \frac{D_{50}}{\sqrt{U_D}} \quad (3/67)$$

$$s \approx 0,273 \cdot \epsilon \cdot \frac{D_{50}}{\sqrt{U_D}} \quad \text{gültig für:} \quad 1 \leq U_D \leq 3$$

und  $0,7 \leq \epsilon \leq 0,9$

Wird, wie im Abschnitt 1. begründet wurde,  $\epsilon = \epsilon_0 \approx 0,9$  angenommen, vereinfacht sich Gleichung (3/67) zu:

$$s \approx \frac{D_{50}}{4 \cdot \sqrt{U_D}} \quad (3/68)$$

(siehe WAFRO 1.42./3, Regel 2, untere Grenze),

Wird weiterhin vereinfacht  $U_D \approx 2$  vorausgesetzt, so ergibt sich:

$$s \approx \frac{D_{50}}{5,66} \approx \frac{D_{50}}{6} \quad (3/69)$$

(siehe WAFRO 1.42./3, Regel 1, untere Grenze).

Die Gleichungen (3/65) und (3/68) wurden in der Form

$$\frac{D_{50}}{4 \sqrt{U_D}} \leq \frac{s}{h} \leq \frac{D_{50}}{1,1 \cdot U_D + 0,8} \quad (\text{Regel 2}) \quad (3/70)$$

auf Abbildung 3/1 des Blattes 3 dieses Standards grafisch dargestellt, sodaß in der Praxis eine denkbar einfache Bemessung der Öffnungen im Filterrohr bzw. Filtergewebe möglich ist, sofern der Brunnen eine Filterschüttung erhält (Normalfall).

Aus Gründen der Rohrfestigkeit wurde in o. g. Standard

$$s_{\max} = 5 \text{ mm} \quad (3/71)$$

gefordert. Diese Regel 5 könnte in außergewöhnlichen Fällen (sehr grober suffosionsgefährdeter Grundwasserleiter) im Widerspruch zu Gleichung (3/61), (3/68) oder (3/39) stehen. Mit Gleichung (3/71) und (3/61) ergibt sich  $d_s \approx 5 \text{ mm}$ , d. h. der Grundwasserleiter besteht in diesem Grenzfall aus Fein- bis Mittelkies. Es kann angenommen werden, daß bei einem solchen oder noch größeren Grundwasserleiter die eventuell suffosionsgefährdeten Kornfraktionen  $d_s > 5 \text{ mm}$  selbst bei sehr hohem Gefälle in Brunnennähe nicht mehr bewegt werden. Der Beweis hierfür könnte durch Berechnung eines extremen Beispiels nach Gleichung (3/24) bis (3/26) geführt werden.

Beispiel: Gegeben sind

$$d_s \approx d_{17} = 0,5 \text{ cm}; \quad n = 0,3; \quad g = 981 \text{ cm/s}^2;$$

$$\nu = 0,0131 \text{ cm}^2/\text{s} \text{ (10 } ^\circ\text{C)}; \quad \gamma_{\text{tr}} = (1 - n) \cdot \gamma_s = 0,7 \cdot 2,65 = 1,86 \text{ p/cm}^3;$$

$$\gamma_w = 1,0 \text{ p/cm}^3; \quad U_D = 10$$

$k$  nach Gleichung (3/8) mit  $\mathcal{F}_1 = 1,0$  für kugelähnlich-abgerundete Kornform

$$k = \frac{3,99 \cdot 1}{0,0131} \cdot \sqrt[3]{10} \cdot \frac{0,3^3}{0,7^2} \cdot 0,5 \approx 9 \text{ cm/s}$$

Errechnet werden

$$\mu_s = 0,82 - 1,8 \cdot 0,3 + 0,0062 (10-5) = 0,31$$

$$\mathcal{F}_0 = 0,6 (1,86-1) \cdot 0,31 \cdot 0,65 \approx 0,1 \quad (\text{Grundwasserfließrichtung normal zur Richtung der Erdschwere})$$

$$J_{s,\text{krit}} = 0,1 \cdot 0,5 \cdot \sqrt{\frac{0,3 \cdot 981}{0,0131 \cdot 9}} = 0,1 \cdot 0,5 \cdot 50 = \underline{\underline{2,5}}$$

Der errechnete Wert von  $J_{s,\text{krit}} = 2,5$  wird bei einem Grundwasserleiter aus Fein- bis Mittelkies höchstens in unmittelbarer Nähe des Brunnens erreicht. Damit kann festgestellt werden, daß Regel 5 des Werkstandards (entspricht Gleichung (3/71)) praktisch nicht im Widerspruch zur Gleichung (3/61) oder (3/70) steht und somit nur in einem sehr extremen Ausnahmefall durch Regel 5 eine gewisse Filterkolmation in einem sehr eng begrenzten Bereich des Brunnenfilters möglich wäre.

### 3.6.2. Sonderfall ohne Anwendung von Filterschichten

Im Sonderfall wird auf die Anordnung von Filterschichten am Filterrohr des Brunnens verzichtet (kurzlebige Grundwasserabsenkungsbrunnen). Beim Johnson- und Horizontalfilterbrunnen wird sogar grundsätzlich keine Filterschicht angewendet. In diesen Fällen gelten für die Bemessung der Filterrohrschlitzweiten andere Gesetzmäßigkeiten.

Eine gewisse Kontakterosion des Grundwasserleiters kann und soll nicht verhindert werden. Dadurch tritt bei Inbetriebnahme bzw. Herstellung der Brunnen durch Entsandung des Grundwasserleiters eine Auflockerungszone auf, in welcher sich ein natürlicher Filter aufbaut.

Die Schlitzweite  $s$  ist so zu bemessen, daß

1. eine gewisse Entsandung des Grundwasserleiters möglich ist,
2. dennoch eine zu intensive Kontakterosion durch die Schlitzweite vermieden wird, damit sich ein natürlicher Filter aufbauen kann und unzulässige Stabilitätsstörungen im Erdkörper um das Brunnenrohr herum vermieden werden (Ausschluß übermäßiger Setzungen).

Der ausspülbare Korndurchmesser  $d_a$  steht somit in folgender Beziehung zur Schlitzweite  $s$ :

$$d_{a,\text{mind}} \leq s \leq d_{a,\text{max}} \quad (3/72)$$

Die untere Grenze für die Schlitzweite ergibt sich aus der Überlegung, daß bei feinkörnigen Erdstoffen (Grobschluffe und Feinsande) ein möglichst großes Korn  $d_{a,\text{mind}}$  auswaschbar sein sollte, während bei grobkörnigen Böden (Kiesen) eine Entsandung unnötig ist. Da noch keine verallgemeinerungsfähigen Versuchsergebnisse vorliegen, wird die folgende vermutete Abhängigkeit

$$d_{a,\text{mind}} = f(d_{50}) \quad (3/73)$$

nach Bild 3/14 zur Anwendung vorgeschlagen. Da die Grundwasserleiter meistens aus gröberen Sanden und Kiesen bestehen, hat die untere Grenze gemäß Gleichung (3/73) nur eine geringe Bedeutung.

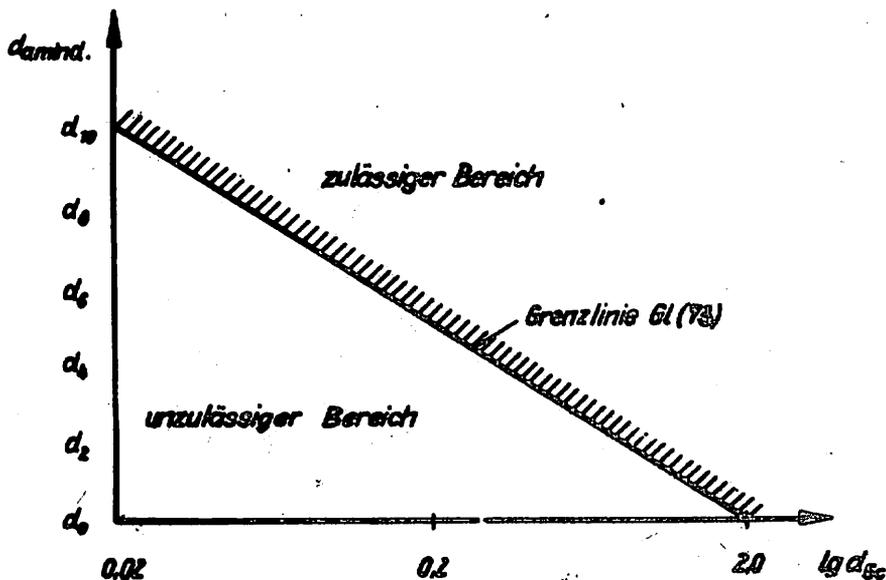


Bild 3/14

Vermutete Abhängigkeit  $d_{a,\text{mind}} = f(d_{50})$

Die obere Grenze für die Schlitzweite wird vorläufig aus Versuchsergebnissen für die Kontakterosion Typ 1/1 bei  $U_D = 1$  und  $1 \leq U_D \leq 20$  von Ziems / 24 / und ebensolchen Versuchsergebnissen des VNIIG Leningrad / 14 / abgeleitet. Dabei muß berücksichtigt werden, daß diese Versuche den hier vorliegenden Sachverhalt nur annähernd richtig widerspiegeln, da bei der Kontakterosion Typ 1/1 unter den genannten Randbedingungen ein mindestens 10 cm dicker Filter vorliegt, während bei der Kontakterosion am geschlitzten Filterrohr nur eine relativ dünne Schlitztiefe (Brunnenrohrdicke) vorhanden ist. Die für die Kontakterosion Typ 1/1 richtigen Beziehungen müssen daher mit einem zusätzlichen Sicherheitsfaktor belegt werden. Die Ursache hierfür ist darin zu sehen, daß der Gewölbebildungsfaktor nach Gleichung (3/46) und (3/42) beim Pulsationsbetrieb nahezu  $F_g \approx 1$  sein wird und auch der Schlupffaktor gemäß Gleichung (3/16)  $F_g > 0,6$  sein wird.

Verallgemeinerungsfähige Versuchsergebnisse liegen für den konkreten Fall noch nicht vor, sodaß ein Meßprogramm zur Prüfung der vorgeschlagenen Abhängigkeit

$$d_{a,max} = f(U_D) \quad (\text{siehe Bild 3/15}) \quad \text{für } p_{a,max} = f(U_D) \quad (3/74)$$

vorzusehen ist. Die Abhängigkeit (3/74) ergibt sich aus der logischen Tatsache, daß sich bei gleichförmigen Erdstoffen eine stabile Brücke aus annähernd gleich großen Körnern besser und schneller ausbildet als bei ungleichförmigen Erdstoffen.

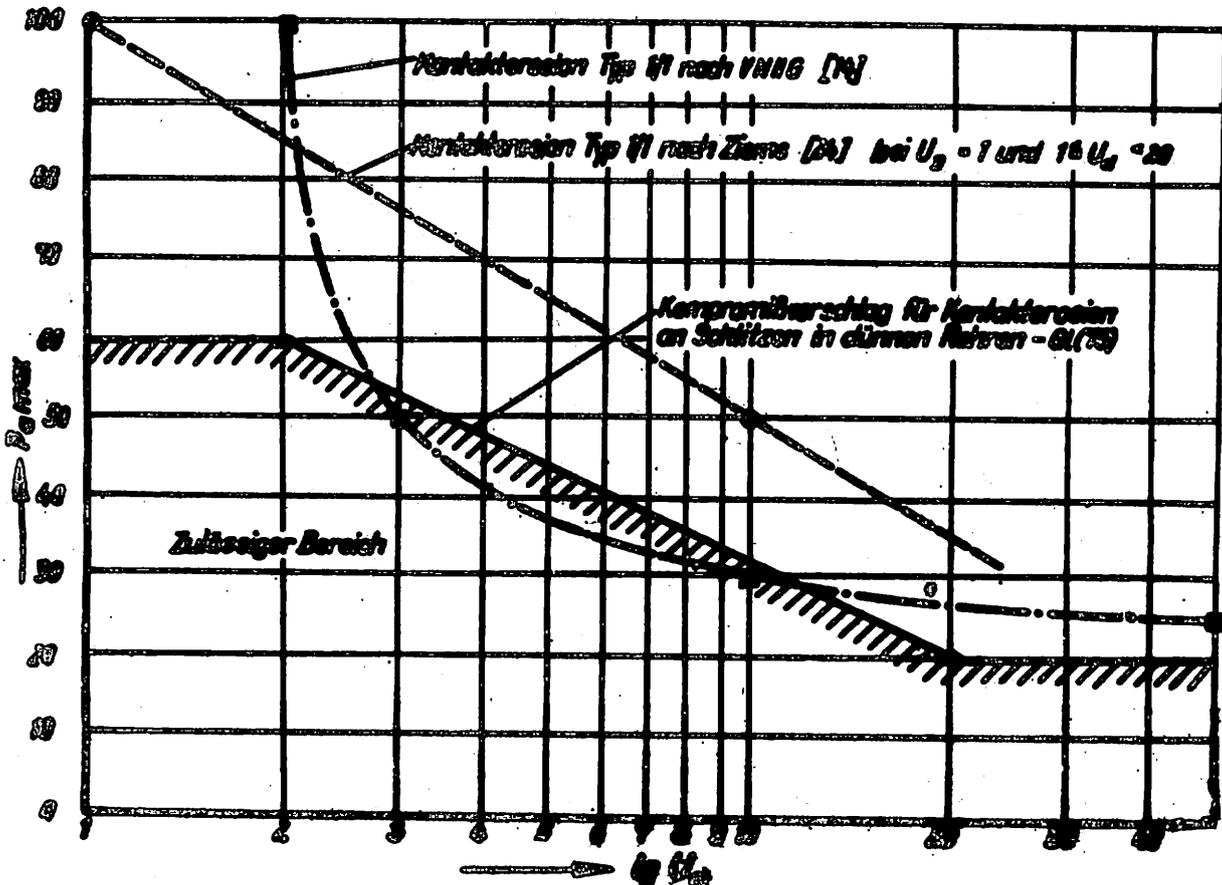


Bild 3/15  
Vorgeschlagene Abhängigkeit  $p_{a,max} = f(U_D)$

Die Tiefe der Auswashingtonszone ergibt sich nach Rückert / 16 / etwa zu:

$$t_a \approx 5 + 8 \quad [\text{cm}] \quad (3/75)$$

während die anschließende Zone der Kornlagerungen einen Radius bis etwa 2 m erreichen soll.

Nach Rückert wurde die beste Kornabstufung im Stützfiter (Auswashingtonszone nach Gleichung

(3/75)) bei einer Schlitzweite im Vortriebskopf des Horizontalfilterstranges von 94 bis 98 % des Größtkornes  $d_{max}$  erreicht. Diese Ergebnisse stehen im Widerspruch zum vorgeschlagenen Bemessungsdiagramm auf Bild 3/15. Vorläufig halten wir jedoch an diesem fest, da die Versuche von Rückert noch nicht verallgemeinert werden können.

Andererseits sind wir uns darüber im klaren, daß die im Bild 3/15 angegebene Kurve zu sichere Werte bei der rotationssymmetrischen Anströmung ergibt. Da bei dieser Strömungsform die Anströmungsgeschwindigkeit linear mit der Entfernung von der Achse abnimmt, wird schon in geringer Entfernung Sicherheit gegen Kontakterosion gemäß Gleichung (3/54) und (3/53) erreicht. Bei wichtigen Anlagen sind daher gegenwärtig Laborversuche gemäß / 16 / zu empfehlen, um optimale Schlitzweiten projektieren zu können.

Literaturverzeichnis 3

- / 1 / ANACKER, H.; RIEMPP, G.:  
"Stand und Entwicklungstendenzen im Ausbau von Bohrbrunnen  
mit Kiesschüttung für die Wasserversorgung"  
WWT Berlin, 18 (1968) 11/12, S. 369
- / 2 / BIESKE, E.:  
"Handbuch des Brunnenbauers"  
Bd. II, Verlag R. Schmidt, Berlin, 1965
- / 3 / ČIŠTIN, J.:  
"Zum Problem einiger mechanischer Deformationen nichtbindiger  
Lockergeresteine durch die Sickerwasserströmung in Erddämmen"  
WWT Berlin, 17 (1967) 2, S. 46
- / 4 / DAVIDENKOFF, R. R.:  
"Dimensionierung von Kiesschüttungsfiltern im Brunnenbau"  
Bohrtechnik - Brunnenbau - Rohrleitungsbau  
Berlin-W, 45 (1968) 1, S. 15
- / 5 / FUCHS, G.:  
"Die wirksamste Abstufung von künstlichen Kiesschüttungen in den  
Filterstrecken bei Bohrbrunnen"  
Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft, TU Berlin  
Mitt. Nr. 60, 1963
- / 6 / HANSEL, N.:  
"Über natürliche Selbstdichtung von Gewässern mit porösem Unter-  
grund und ihre hydrologisch-wasserwirtschaftlichen Auswirkungen"  
Wiss. Z. HfB Leipzig, Heft 4, 1967, S. 2<sup>c</sup>
- / 7 / ISTOMINA, V. S.:  
"Die Filtrationsbeständigkeit der Böden"  
(russ.), Jzd. po stroit. i arch., Moskau, 1957
- / 8 / KITTNER; STARKE; WISSEL:  
"Wasserversorgung"  
Taschenbücher für das Bauwesen,  
VEB Verlag für Bauwesen Berlin, 1964
- / 9 / LEMCKE, W.:  
"Geometrische Grenzbedingungen für die örtliche Verformungs-  
beständigkeit nichtbindiger Lockergeresteine gegenüber Wirkungen  
des Sickerwassers", Diplomarbeit  
TU Dresden, Sektion Wasserwesen, Bereich Wasserbau, 1967
- / 10 / LEMCKE, W.:  
"Untersuchungen zur Strukturbeständigkeit nichtbindiger Erd-  
stoffe bei Durchsickerung"  
Zwischenbericht zur Forschungsarbeit Nr. 20.20.3.01.06.,  
TU Dresden, Sektion Wasserwesen, Bereich Wasserbau, 1969
- / 11 / LUBOČKOV, E. A.:  
"Eine grafische und analytische Methode zur Bestimmung der  
Suffosionseigenschaften nichtbindiger Böden"  
(russ.), Izv. VNIIG, Leningrad, Bd. 78, 1965

- / 12 /  
PAAVEL, V.:  
"Maßgebende Faktoren in der Entwicklung des Brunnenfilters"  
Bohrtechnik - Brunnenbau - Rohrleitungsbau  
Berlin-W, 29 (1952) 1, S. 9
- / 13 /  
PATRAŠEV, A. N.:  
"Methoden zur Berechnung der mechanischen und chemischen  
Suffosion"  
(russ.), Izv. VNIIG, Leningrad, 1951
- / 14 /  
PATRAŠEV, A. N.; PRAVEDNYI, G. Ch.; PAVČIČ, M. J.:  
"Anleitung für die Projektierung von Filtern für Wasserbauten"  
VEN -02-65, Izd. Energija, Moskau, 1965  
(Übersetzung bei der TU Dresden, Sektion Wasserwesen,  
Bereich Wasserbau)
- / 15 /  
REHFELD, E.:  
"Anwendung und Auswahl von Sand- und Kiesfiltern im Wasser-  
bau und ihre zweckmäßige Bemessung"  
VEB Baugrund, Berlin, 1966
- / 16 /  
RÜCKERT, H.:  
"Über den Schutzfilteraufbau von Strängen bei Horizontal-  
filterbrunnen"  
Wiss. Z. HfB Leipzig, Heft 3, 1967, S. 129
- / 17 /  
SICHARDT, W.:  
"Kies- und Sandfilter im Grund- und Wasserbau"  
Die Bautechnik, Berlin-W, 29 (1952) 3/4
- / 18 /  
SILVEIRA, A.:  
"Eine Untersuchung des Problems des Einspülens von Erdstoffteil-  
chen in Schutzfilter"  
(engl.), Proc. 6 Int. Conf. Soilmech. and Foundation  
engl., Montreal, 1965, Vol. II. Div. 6/27, S. 551
- / 19 /  
TERZAGHI, K.; PECK, R. B.:  
"Die Bodenmechanik in der Baupraxis"  
Springer-Verlag, Berlin, 1961
- / 20 /  
ZAUERBREJ, I. I.:  
"Über die Wasserdurchlässigkeitsbeiwerte der Böden und  
die Methodik seiner Bestimmung"  
(russ.), Izv. VNIIG, Leningrad, 1931 (Bd. 3) und 1932 (Bd. 5)
- / 21 /  
ZIEMS, J.:  
"Erosionsbeständigkeit nichtbindiger Lockergesteine"  
Abschlußberichte der Forschungsstudie Nr. 3507-26/ST.-4/18/4  
und der Forschungsarbeit Nr. 4507-026/6-22/5,  
TU Dresden, Sektion Wasserwesen, Bereich Wasserbau, 1965 und 1967
- / 22 /  
ZIEMS, J.:  
"Zur Klassifizierung der mechanischen Erdstoffverformungen durch  
Wirkungen des Sickerwassers"  
WWT, Berlin 17 (1967) 2, S. 50

- / 23 /  
ZIEMS, J.:  
"Suffosion nichtbindiger Erdstoffe"  
WAPRO 4.04. Blatt 2  
VEB Projektierung Wasserwirtschaft Halle, 1968
- / 24 /  
ZIEMS, J.:  
"Beitrag zur Kontakterosion nichtbindiger Erdstoffe"  
Dissertation, TU Dresden, Sektion Wasserwesen,  
Bereich Wasserbau, 10. 4. 1969
- / 25 /  
ZWECK; DAVIDENKOFF, R. R.:  
"Versuche zu Filtern mit gleichmäßiger Granulometrie"  
Proc. 4 Conf. Soilmech. and Found., engl. London, 1957  
Bd. II, S. 410
- / 26 /  
TGL 22 964 Ausg. 3.69  
"Filtersande - Filterkiese"  
Verbindlich ab 1. 1. 1970