

**B R U N N E N  
FÜR GRUNDWASSERGEWINNUNGSANLAGEN**

**H O R I Z O N T A L F I L T E R B R U N N E N**

**S T U D I E  
ZU DEN BEMESSUNGSGRUNDLAGEN**

**Verfasser:** Dr.-Ing. H. Eickert  
Hochschule für Bauwesen Leipzig,  
Sektion Ingenieurbau

**VEB PROJEKTIERUNG WASSERWIRTSCHAFT-HALLE**

## Vorwort

Zur Deckung des Wasserbedarfs der Bevölkerung und der Industrie kommt der Grundwassergewinnung in allen hochentwickelten Industrieländern eine zunehmende Bedeutung zu.

Die Grundwasserfassung wird mit Vertikalfilterbrunnen, Schachtbrunnen, Horizontalfilterbrunnen, Sickerleitungen u.a. vorgenommen. Gegenwärtig kommt fast ausschließlich der Vertikalfilterbrunnen zur Anwendung, und zwar auch dort, wo nach Meinung von Fachleuten ein Horizontalfilterbrunnen wirtschaftlich einsetzbar wäre. Der vorliegende Werkstandard "WAFRO 1.41. Bemessungsgrundlagen für Grundwassergewinnungsanlagen - Horizontalfilterbrunnen -" soll dazu beitragen, die Kenntnisse über die Bemessung von Horizontalfilterbrunnen einem größeren Kreis von Fachkollegen zugänglich zu machen und die Ermittlung einer wirtschaftlichen Fassungsart zu ermöglichen.

Nach WAFRO 1.41. können Einzelbrunnen wie auch Mehrbrunnenanlagen von Horizontalfilterbrunnen in ungespanntem und gespanntem Grundwasser berechnet werden. Zur Berücksichtigung der äußeren Randbedingungen der Horizontalfilterbrunnen ist jeweils WAFRO 1.42. "Bemessungsgrundlagen für Brunnen von Grundwassergewinnungsanlagen" anzuwenden.

Zur Herstellung der Filterstränge wird in der Regel ein Vortriebsverfahren (z.B. Ranney - Verfahren) angewandt, bei dem ein natürlicher Filter (Stützfilter) entsteht. Nach dem Werkstandard ist der Einfluß des Stützfilters auf die Förderleistung des Horizontalfilterbrunnens und auf die Sicherheit gegen Versandung der Filterstränge zu berücksichtigen.

Die Vortriebstechnologie der Stränge hat wesentlichen Einfluß auf die Stützfilterausbildung. Daher ist zwischen dem projektierenden und dem baudurchführenden Betrieb eines Horizontalfilterbrunnens eine besonders enge Zusammenarbeit erforderlich. Die einzelnen Schritte bei der Projektierung bis zum Variantenvergleich mit anderen Fassungsarten sind in einem Algorithmus festgelegt, der Bestandteil des Werkstandards ist.

In der vorliegenden Studie erfolgt im ersten Teil eine Erläuterung des Werkstandards, indem die einzelnen Aussagen - soweit es in diesem Rahmen möglich ist - begründet werden. Teilweise erfolgt auch eine Ableitung der Formeln.

Die Gliederungspunkte sind analog zum Werkstandard gewählt worden.

Der zweite Teil der Studie enthält drei Berechnungsbeispiele.

Die Studie und der Werkstandard sollen allen Fachkollegen ein Hilfsmittel sein, um die Projektierung und die Baudurchführung nach einheitlichen modernen Gesichtspunkten vorzunehmen. Für Hinweise und Ergänzungsvorschläge zur Studie und zum Werkstandard ist der Herausgeber dankbar.

VGB Projektierung Wasserwirtschaft Halle (Saale)

Dipl.-Ing. Wiechmann  
Technischer Direktor

Im November 1972

## Inhaltsverzeichnis

	Seite
1. Grundsätze	2
1.1. Verwendete Bezeichnungen	2
1.2. Konstruktion und Herstellung des Horizontalfilterbrunnens	4
1.3. Nachweis der effektiven Fassungsart	4
1.4. Bestimmung der Erdstoffkennwerte	5
1.5. Hinweise zur optimalen Gestaltung des Horizontalfilterbrunnens	6
2. Berechnung und Herstellung der Horizontalfilterstränge	8
2.1. Förderleistung des Horizontalfilterbrunnens	8
2.1.1. Ersatzbrunnen	9
2.1.1.1. Brunnen im ungespannten Grundwasser	9
2.1.1.2. Brunnen im gespannten Grundwasser	10
2.1.2. Horizontalfilterbrunnen	12
2.1.3. Kontrolle der vorhandenen Förderleistung des Horizontalfilterbrunnens	16
2.2. Spülmenge	17
2.3. Stützfilter	20
2.3.1. Äußere Abmessungen des Stützfilters	20
2.3.2. Dicke der natürlichen Kornabstufung	22
2.3.3. Einfluß des Stützfilters auf die Förderleistung	25
2.4. Sicherheit gegen Versandung	28
2.5. Herstellung der Horizontalfilterstränge	33
2.5.1. Filterrohr	33
2.5.2. Vortriebstechnologie	33
2.5.3. Stützfilterausbildung	34
2.5.4. Strangabweichungen	35
Berechnungsbeispiele	
- Beispiel 1	37
Beispiel 2	40
Beispiel 3	45
Literaturverzeichnis	56

1. Grundsätze

1.1. Verwendete Bezeichnungen

$a_g$	[ mm ]	Vertikaler Abstand zwischen der vorhandenen Vortriebsachse und der vorhandenen Strangachse (Bild 9)
$a_y$	[ mm ]	Vertikaler Abstand zwischen der geplanten Vortriebsachse und der vorhandenen Strangachse
$b_{St}$	[ m ]	Breite des Stützfilters
$d_w$	[ mm ]	wirksame Korngröße
$d_{wn}$	[ mm ]	wirksame Korngröße vom Erdstoff des Grundwasserleiters
$d_{wI}$	[ mm ]	mittlere wirksame Korngröße im Bereich I des Stützfilters
$d_{wR}$	[ mm ]	wirksame Korngröße am Filterrohr
$d_x$	[ mm ]	Korndurchmesser des Erdstoffes bei x % Siebdurchgang der Kornverteilungskurve
$e$	-	Porozität
$exp$	-	Exponentialfunktion, $exp\ x = e^x$
$f$	-	Beiwert, der bei der Bestimmung der Förderleistung des Horizontalfilterbrunnens die Höhenlage der Filterstränge berücksichtigt
$h$	[ m ]	Höhenlage der freien Grundwasseroberfläche über der fiktiven horizontalen Schale bei ungespannten Verhältnissen Höhenlage der Druckhöhenfläche über der Bezugsebene $z = 0$ bei gespannten Verhältnissen
$h_E$	[ m ]	dgl. wie bei $h$ im Abstand von $r_H = 80$ m von der Brunnenachse
$h_H$	[ m ]	Höhenlage der freien Grundwasseroberfläche über der fiktiven horizontalen Schale bei ungespannten Verhältnissen im Abstand von $r_H = 80$ m von der Brunnenachse
$h_n$	[ m ]	Grundwassermächtigkeit
$h_R$	[ m ]	Höhenlage der Strangebene über der fiktiven horizontalen Schale
$h_S$	[ m ]	Höhenlage der freien Grundwasseroberfläche im natürlichen Zustand über der Strangachse
$h_{St}$	[ m ]	Höhe des Stützfilters
$k$	[ $\frac{cm}{s}$ ]	Durchlässigkeitsbeiwert für Wasser
$L$	[ m ]	Länge eines Horizontalfilterstranges
$M$	[ m ]	Mächtigkeit des Grundwasserleiters
$m$	[ mm ]	Dicke der natürlichen Kornabstufung vom Stützfilter
$m_{Sp}$	[ t ]	Spülgutmenge (Trockenmasse) in [ t ] pro lfd. m Vortrieb
$n$	-	Anzahl der Horizontalfilterstränge
	-	Porozität
$n_n$	-	Porozität im Grundwasserleiter
$n_{II}$	-	Porozität im Bereich II des Stützfilters
$n_{max}$	-	Porozität vom Erdstoff des Grundwasserleiters bei lockerster Lagerung
$Q$	[ $\frac{cm^3}{s}$ ]	Förderleistung des Horizontalfilterbrunnens
$Q_{Sp}$	[ $\frac{cm^3}{s}$ ]	Spülmenge (Wassermenge des in den Vortriebskopf eintretenden Wasser - Erdstoff - Gemisches)
$r_E$	[ m ]	Ersatzradius des Horizontalfilterstranges unter Beachtung des Stützfilters
$r_H$	[ m ]	Radius des Ersatzbrunnens ( $r_H = 80$ m)
$r_R$	[ m ]	Außenradius des Horizontalfilterrohres
$s_o$	[ m ]	Gesamtabenkung des Wasserspiegels im H.Br.

$s_{OE}$	[ m ]	Absenkung im Ersatzbrunnen (bei $r_H = 80$ m)
$s_{OH}$	[ m ]	Absenkung von $h_H$ (bei $r_H = 80$ m) bis zum Brunnenwasserspiegel
$u$	[ mm ]	Schlitzweite im Vortriebskopf
$v_E$	[ $\frac{cm}{s}$ ]	Eintrittsgeschwindigkeit der Spülmenge, bezogen auf die mit Schlitzen versehene Oberfläche des Vortriebskopfes
$v_{KR}$	[ $\frac{cm}{s}$ ]	Geschwindigkeit, bei der die Ausspülung der Körnung am Vortriebskopf beginnt
$v_R$	[ $\frac{cm}{s}$ ]	Geschwindigkeit im Entsandungsrohr
$v_S$	[ $\frac{cm}{s}$ ]	Sinkgeschwindigkeit des Erdstoffes
$v_V$	[ $\frac{cm}{s}$ ]	Vortriebsgeschwindigkeit der Stränge
$w_S$	[ mm ]	Schlitzweite im Filterrohr
$\eta$	[ - ]	Sicherheit gegen Versandung
$\eta_S$	[ - ]	Sicherheit gegen Versandung unter Beachtung der Verschiebung der Strangachse
$f_2$	[ - ]	Anteil der spezifischen Potentialdifferenz, der durch die äußeren Randbedingungen des Grundwasserströmungsfeldes bestimmt wird (siehe WAFRO 1.42. Bl. 2)
$\phi$	[ $m^2$ ]	Girinskij - Potential (siehe WAFRO 1.42. Bl. 2)

### 1.2. Konstruktion und Herstellung des Horizontalfilterbrunnens

Der Horizontalfilterbrunnen besteht aus einem Sammelschacht mit horizontalen Filtersträngen. Der Sammelschacht wird hergestellt als

- Senkbrunnen, Innendurchmesser 4,0 m (Methode der Brunnengründung im Grundbau) [23], S. 74,
- Stahlzylinder von 4,50 m Durchmesser (Abteufung des Stahlzylinders mit Saugpflbohranlage) [19], S. 104,
- Stahlzylinder von 2,20 m Durchmesser (Abteufung des Stahlzylinders mit Pressen; wird für Kleinhorizontalfilterbrunnen verwendet) [30], S. 241.

Von den vielen Verfahren zum Vortrieb der Stränge [27], S. 133 wird das Ranney-Verfahren am häufigsten angewandt.

Bei dem Vortrieb nach dem Ranney-Verfahren werden mit einer hydraulischen Presse die Stränge vom Schacht aus in den Grundwasserleiter getrieben. Dabei wird die Pressenkraft auf das äußere Rohr, das als Filterrohr ausgebildet ist, übertragen.

In dem Filterrohr 1, an dem vorn der Vortriebskopf 2 befestigt ist, ist das Entsandungsrohr 3 angeordnet. Infolge des in die Schlitze des Vortriebskopfes 2 eintretenden Wassers wird eine Entsandung in der näheren Umgebung des Vortriebskopfes bewirkt, so daß ein Stützfilter längs des vorgetriebenen Stranges entsteht. Nach Beendigung des Vortriebes wird das Entsandungsrohr 3 gezogen und ein Absperrorgan 4 angebracht.

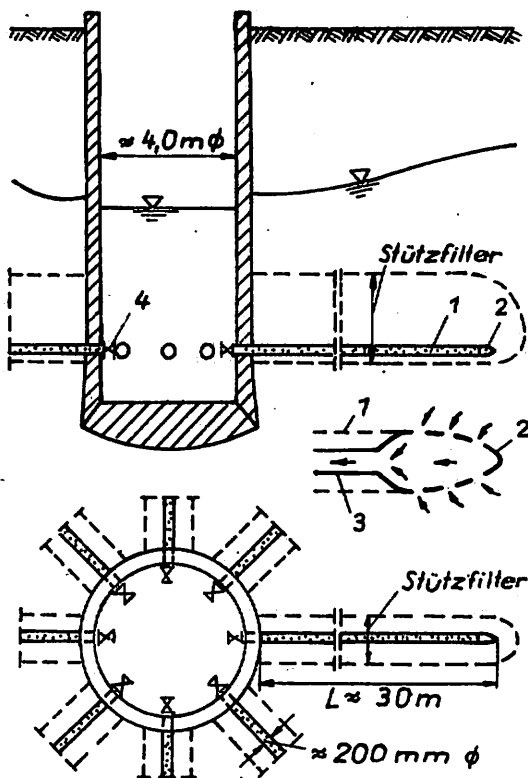


Bild 1 Sammelschacht mit Filtersträngen

### 1.3. Nachweis der effektiven Fassungsart

Der Nachweis der effektiven Fassungsart wird durch Abarbeitung des "Algorithmus für die Bemessung von Horizontalfilterbrunnen" des Standards geführt. Dabei werden an folgenden Stellen Entscheidungen über die Fassungsart getroffen:

#### Nr. 1 vom Algorithmus

Die nach Anlage 1 vorzunehmende Prüfung ist nur als eine Vorentscheidung zu werten. Anlage 1 ist auf der Grundlage von Erfahrungswerten aufgestellt. In Wirklichkeit haben wesentlich mehr Größen als in Anlage 1 angegeben auf die Wahl der Fassungsart Einfluß.

Der in Anlage 1 angeführte Kleinhorizontalfilterbrunnen ist ein Horizontalfilterbrunnen, dessen Abmessungen kleiner als die des normalen Horizontalfilterbrunnens (Bild 1) sind

(kleinerer Schachtdurchmesser, kürzere Filterstränge und in der Regel auch kleinerer Filterrohrdurchmesser). Der Standard ist auch für Kleinhorizontalfilterbrunnen anwendbar, wenn die normalen Filterrohre mit rd. 200 mm Durchmesser und dem anderen Zubehör wie in [8] beschrieben verwendet werden.

Kästchen vor Nr. 17 vom Algorithmus

Ist der Algorithmus bis vor das Kästchen von Nr. 17 abgearbeitet worden, so ist nachgewiesen, daß der Horizontalfilterbrunnen technisch als Variante möglich ist.

Nr. 17 vom Algorithmus

Erst der ökonomische Variantenvergleich unter Berücksichtigung der Bau-, Betriebs- und Unterhaltungskosten bringt die endgültige Entscheidung über die zu wählende Fassungsart. Bei Entscheidung für den Horizontalfilterbrunnen ist außerdem bei mehreren technisch möglichen Varianten zu prüfen, welche am wirtschaftlichsten ist.

Durch die Verbesserung der Berechnungsgrundlagen ist die Erbringung des Nachweises der Förderleistung, indem mehrere Vertikalbrunnen vor Baubeginn des Horizontalfilterbrunnens an dessen Standort errichtet und betrieben werden, nicht mehr erforderlich.

#### 1.4. Bestimmung der Erdstoffkennwerte

Nach Abschnitt 1.4. des Standards muß von jedem Strang aus der Vortriebsachse bekannt sein

- die Korngrößenverteilung mit den Werten bis  $d_{100}$  und  $d_{wn}$

- der Porenanteil bei natürlicher Lagerung  $n_n$
- der Porenanteil bei lockerster Lagerung  $n_{max}$
- der Durchlässigkeitsbeiwert  $k = f(n)$  oder  $k = f(e)$ .

Diese Werte sind aus den in der Vortriebschnebene entnommenen Erdstoffproben zu bestimmen. Die wirksame Korngröße  $d_{wn}$  wird hinreichend genau nach Beyer [4], S. 1045 bestimmt:

$$d_{wn} = c \cdot d_{10} \quad (1)$$

Tabelle 1

$U = \frac{d_{60}}{d_{10}}$	$c = \frac{d_{wn}}{d_{10}}$	
	Bereichswerte	Mittelwert
1,0 bis 1,9	1,0 bis 1,6	1,4
2,0 bis 2,9	1,6 bis 1,9	1,8
3,0 bis 4,9	1,9 bis 2,2	2,1
5,0 bis 9,9	2,2 bis 2,5	2,3
>10,0	>2,5	>2,5

Näherungsweise dürfen aus der Korngrößenverteilung die Größen  $n_n$ ,  $n_{max}$  und  $k$  bestimmt werden. Es sind dazu die von Beyer [5], S. 59 aufgestellten Beziehungen zu verwenden. Danach werden  $n_n$  und  $n_{max}$  nach Bild 2 und der Durchlässigkeitsbeiwert nach Gl.(2) ermittelt.

$$k = C \cdot 10^{-4} \cdot d_{10}^2 \left[ \frac{m}{s} \right] \quad d_{10} [mm] \quad (2)$$

Der Proportionalitätsfaktor C wird aus Bild 3 entnommen. Diese Untersuchungen besitzen Gültigkeit für Kiese und Sande im Bereich  $d_{10} = 0,06$  mm bis 0,6 mm und für Ungleichförmigkeiten  $U = 1$  bis 20.

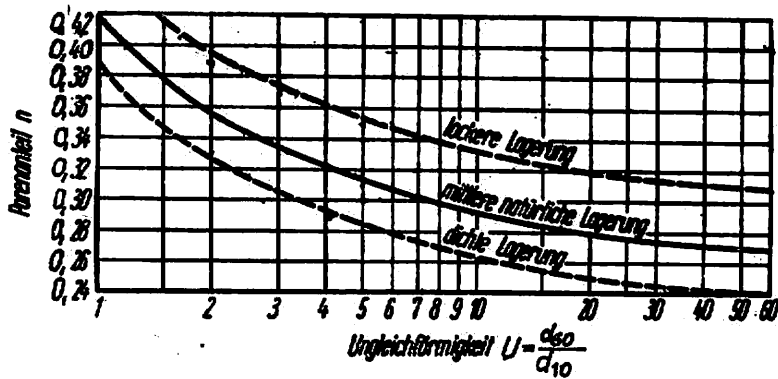


Bild 2 Abhängigkeit des Porenanteils n von der Ungleichförmigkeit U nach experimentellen Untersuchungen (nach Bayer)

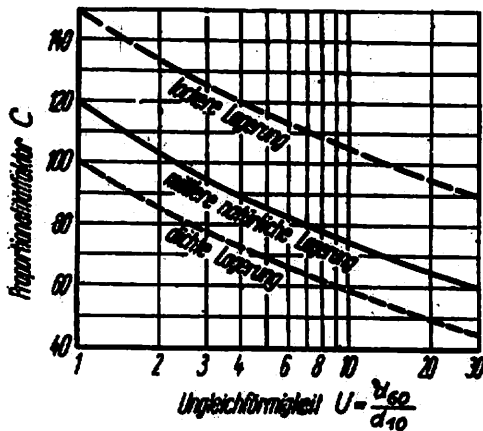


Bild 3 Proportionalitätsfaktor C = f(U) für diluviale Sande und Kiese für Gl.(2), (nach Bayer)

Die Beziehung  $k = f(n)$  oder  $k = f(e)$  wird zur Ermittlung des Ausdruckes  $k_n/k_{II}$  in Gl.(26) des Standards benötigt. Wird die Ermittlung von  $k = f(n)$  oder  $k = f(e)$  nicht vorgenommen, so darf der Ausdruck  $k_n/k_{II}$  näherungsweise nach Gl.(27) des Standards bestimmt werden. Nach Zunker gilt

$$k_1 : k_2 = C_1^2 e_1^2 : C_2^2 e_2^2$$

Wird der Einfluß von  $C_1^2$  und  $C_2^2$  vernachlässigt, so wird erhalten [15], S. 128

$$k_1 : k_2 = e_1^2 : e_2^2 \quad (3)$$

Wird die Porenziffer e durch den Porenanteil n ausgedrückt und die Bezeichnungen des Standards von Abschnitt 2.3.3. verwendet, so kann Gl.(3) in der Form Gl.(27) des Standards

$$\frac{k_n}{k_{II}} = \left[ \frac{n_n(1 - n_{II})^2}{n_{II}(1 - n_n)} \right]^2 \quad (4)$$

geschrieben werden.

### 1.5. Hinweise zur optimalen Gestaltung des Horizontalfilterbrunnens

Für die Praxis konkret anwendbare Beziehungen über die Wahl der Stranglänge bzw. der Stranganzahl unter Erfassung der jeweils vorliegenden Verhältnisse sind nicht bekannt. Die Stranganzahl n und die Stranglänge L üben den Haupteinfluß auf die hydraulischen Verhältnisse im Fassungsstrang aus und damit auf die Förderleistung Q. Die hydraulischen Verhältnisse im Fassungsstrang werden beeinflusst durch die Größe der Eintrittsgeschwindigkeit des Grundwassers längs des Fassungsstranges. Die Verteilung der Eintrittsgeschwindigkeit bewirkt



eine bestimmte Geschwindigkeitsverteilung (im Fassungsstrang) längs des Fassungsstranges und damit einen bestimmten Druckhöhenverlust, der Bestandteil der Absenkung  $s_{OH}$  des Horizontalfilterbrunnens ist.

Zur Eintrittsgeschwindigkeit längs des Fassungsstranges haben Falcke [21] und Stack [29] Modellversuche durchgeführt und Hünerberg [11] Messungen in der Natur vorgenommen. Es gilt [21], S. 115:

Der Grundwassereintritt erfolgt vorwiegend am Strangkopf, wenn der Druckverlust des Grundwassers im Bodengefüge größer ist als im Fassungsstrang. Das liegt vor, wenn bei

- a) kleinem  $k$ -Wert trotz großer Absenkung die Förderleistung des Stranges gering ist, oder wenn
- b) der Horizontalfilterbrunnen mit vielen kurzen Strängen ausgerüstet ist, oder wenn
- c) die Stränge einen großen Rohrdurchmesser haben.

Bei großem  $k$ -Wert mit wenigen und langen Filtersträngen, wo die einströmende Wassermenge im Verhältnis zum Rohrdurchmesser groß ist, überwiegen die Druckverluste im Fassungsstrang und das Grundwasser tritt vorwiegend in Nähe des Sammelschachtes ein. Falcke [21], S. 118 hat bei Modellversuchen gefunden, daß mit Vergrößerung der Stranganzahl die Leistung eines Horizontalfilterbrunnens in stärkerem Maße als mit der Stranglänge zu steigern ist. Es ist mithin besser, viele und kurze Stränge als wenige und lange Stränge bei der gleichen Gesamtstranglänge zu wählen.

Bei einem kleinen Wert  $h_s$  (Höhenlage der Strangachse unter dem Ruhegrundwasserspiegel) ist, um die geforderte Sicherheit gegen Versandung zu gewährleisten, insbesondere bei einem kleinen  $k$ -Wert die Stranglänge  $L$  klein zu wählen. Als mittlere Stranglänge wird 30 m angesehen.

Aus Gründen der konstruktiven Anordnung der Filterrohröffnungen im Sammelschacht und des Vortriebes sind in einer Strangebene nicht mehr als 10 Stränge vorzusehen.

Falcke [7] fand durch Modellversuche, daß die größte Förderleistung bei Gl.(1) des Standards

$$\frac{h_R}{h_H} = 0,46 \quad (5)$$

erreicht wird (siehe Bild 7 der Studie und Anlage 2/2 des Standards).

Nach dem Standard sind die Filterstränge auf eine Länge von ca. 20 % der Stranglänge am Brunnenschacht vollwandig auszubilden. Der Grund dafür ist:

- Im allgemeinen ist bei Anordnung von Filterrohren über die gesamte Stranglänge in Nähe des Sammelschachtes die Eintrittsgeschwindigkeit relativ klein gegenüber dem anderen Strangteil.
- Der Reibungsbeiwert vom Filterrohr weist den mehrfachen Wert vom vollwandigen Rohr auf. Stack [29], S. 266 hat an einem Horizontalfilterbrunnen durch Messungen im Filterrohr (Schlitzbrückenfilter) einen Reibungsbeiwert von  $\xi = 0,08$  ermittelt, der damit mehr als 4 mal so hoch wie in einem glatten Rohr ist. Falcke [7] hat bei der Aufstellung der Bemessungstafel  $\xi = 0,1$  zugrunde gelegt (Anlage 2/1 des Standards).
- Am Sammelschacht ist bedingt durch die Schachtherstellung und den Stützfilter ein bevorzugter Sickerweg des Oberflächenwassers und oberflächennahen Grundwassers vorhanden. Der Stützfilter ist, um ein Versetzen der Filterschlitz mit Sandkörnern weitgehend zu vermeiden, unmittelbar am Sammelschacht besonders gut auszubilden (siehe Abschnitt 2.5.3.). Das heißt, unmittelbar am Sammelschacht wird eine besonders intensive Entsandung beim Vortrieb der Stränge vorgenommen. Durch das Vollwandrohr wird die die Wasserqualität herabsetzende Kurzschlußströmung längs des Sammelschachtes vermieden.

Die in Gl.(2) des Standards angeführte Filterrohrschlitzweite  $w_s \cong 1,5$  bis 2,0 mm ist nach Erfahrungswerten festgelegt. Es sollte stets versucht werden, eine möglichst große Schlitzweite  $w_s$  zu erreichen und die damit verbundene ökonomisch ungünstige kleine Vortriebsgeschwindigkeit  $v_v$  hinzunehmen. Bei Modellversuchen (M 1:1) zeigte sich, daß bei einer kleinen Schlitzweite ein größerer Anteil der Schlitzte versetzt war als bei der Schlitzweite  $w_s = 5$  mm [28].

Nach Gl.(3) des Standards ist bei der Wahl der Schlitzweite  $u$  im Vortriebskopf  $d_{94} \approx u < d_{100}$  anzustreben, wobei stets  $u < d_{100}$  zu gewährleisten ist. In Auswertung der Modellversuche ergab sich, daß bei einer Schlitzweite  $u = 9$  bis  $12$  mm (entspricht bei dem verwendeten Versuchsmaterial  $d_{94}$  bis  $d_{98}$ ) die durch Spülwirkung erreichte Korngrößenverteilung am Filterrohr bzw. die Sicherheit gegen Versandung nahezu konstant war. Während ab  $u < d_{94}$  die Sicherheit gegen Versandung merklich kleiner wurde [28], S. 87/88.

Die Schlitzweite  $u$  darf in keinem Fall größer als das Größtkorn  $d_{100}$  gewählt werden, weil sonst große Teile des groben Kornes für die natürliche Kornabstufung verloren gehen (werden mit ausgespült) und sich unnötig große Spülgutmengen ergeben. Wird die Forderung  $u < d_{100}$  nicht beachtet, so besteht Gefahr, daß Nr. 8 und Nr. 16 vom Algorithmus des Standards zwar der Rechnung nach aber in Wirklichkeit nicht erfüllt sind.

In Tabelle 1 des Standards sind in Abhängigkeit von den Werten  $Q_{Sp}/k$  die bei der Projektierung anzunehmenden Mindestmengen an Spülgut  $m_{Sp}$  angegeben. Kleinere Werte für  $m_{Sp}$  dürften beim Vortrieb in der Natur - bei Einhaltung von Gl.(3) des Standards - kaum erreicht werden. Nach Herstellung der Horizontalfilterstränge ist die Ermittlung des Stützfilterquerschnittes mit den tatsächlich beim Vortrieb angefallenen Spülgutmengen zu wiederholen.

Gl.(4) des Standards,  $v_v \approx 0,1$  m/h, gibt die Vortriebsgeschwindigkeit an, die ökonomisch gerade noch vertretbar ist.

In Gl.(5) und Gl.(6) des Standards ist die erforderliche Sicherheit gegen Versandung angegeben. Zur Ermittlung der Sicherheit gegen Versandung wird die von Čiřtin aufgestellte und von Ziems korrigierte Grafik verwendet (siehe Bild 17). Die von Čiřtin/Ziems aufgestellten Beziehungen wurden vorrangig auf der Grundlage von Versuchen erzielt. Bei der Versuchsdurchführung wurde das hydraulische Gefälle bis  $J = 9$  erhöht. Bei der Anströmung der Horizontalfilterstränge ist aber ein sehr viel kleineres hydraulisches Gefälle vorhanden. Das heißt, die nach dem Standard ermittelte Sicherheit  $\eta$  gegen Versandung ist in Wirklichkeit viel größer.

## 2. Berechnung und Herstellung der Horizontalfilterstränge

### 2.1. Förderleistung des Horizontalfilterbrunnens

Zur Ermittlung der Förderleistung des H.Br. werden die von Falcke [7] aufgestellten Beziehungen verwendet. Die von Falcke geschaffenen Formeln und Grafiken sind auf der Grundlage von Modellversuchen ermittelt. Falcke wählte dazu ein Sektormodell. Die Reichweite dieses Modells entspricht unter Beachtung des Modellmaßstabes einer Reichweite in der Natur von  $r_H = 80$  m. Die in der Natur im allgemeinen größeren Werte als  $80$  m hat Falcke durch einen Korrekturfaktor berücksichtigt, der unabhängig von den äußeren Randbedingungen des Horizontalfilterbrunnens aber von gleicher Größe ist, siehe Gl.(22a).

Zur exakten Erfassung der äußeren Randbedingungen des H.Br. wird die hydraulische Berechnung vom Verfasser in zwei Schritten durchgeführt:

- Ermittlung des Brunnenwasserstandes  $h_B$  für den Ersatzbrunnen (vollkommener Vertikalbrunnen), dessen Brunnenradius  $r_H = 80$  m beträgt. Dabei sind die in der Natur vorhandenen äußeren Randbedingungen zu berücksichtigen.
- Es wird die Bemessung des H.Br. auf der Grundlage der Formel von Falcke durchgeführt. Die äußeren Randbedingungen sind hier gekennzeichnet durch  $r_H = 80$  m und den Brunnenwasserstand des Ersatzbrunnens  $h_B$ .

Durch Anwendung dieses Verfahrens können auch Mehrbrunnenanlagen von Horizontalfilterbrunnen berechnet werden. Die Berechnung erfolgt im 1. Schritt durch Anwendung von WAFRO 1.42. Bl. 2, indem jeder H.Br. durch einen vollkommenen Vertikalbrunnen mit einem Brunnenradius  $r_H = 80$  m ersetzt wird. Im 2. Schritt wird jeder H.Br. getrennt bemessen.





b)  $Q < Q^*$

Es ergibt sich  $h_E > M$ . Das bedeutet, daß in dem Bereich ( $r_H - r^*$ ) gespanntes Grundwasser vorhanden ist. Es gilt Gl.(9) der Studie. Der Wasserstand im Ersatzbrunnen ergibt sich zu

$$\text{Gl.(10) des Standards} \quad h_E = h_n - \frac{Q}{4\pi k F} \cdot \frac{f_2}{M} \quad (9a)$$

Die Höhe  $h_E$  bezieht sich auf Verhältnisse bei gespanntem Grundwasser. Für die H.Br.- Bemessung nach Gl.(32) bzw. Gl.(33) wird die Höhe bei ungespanntem Grundwasser benötigt. Bei der Umrechnung wird der Bereich innerhalb des Ersatzbrunnens betrachtet.

ungespanntes Grundwasser:

$$\phi_{n \text{ ungesp.}} - \phi_{\text{ungesp.}} = \frac{Q}{4\pi k} \cdot f_2 \quad (13)$$

gespanntes Grundwasser:

$$\phi_{n \text{ gesp.}} - \phi_{\text{gesp.}} = \frac{Q}{4\pi k} \cdot f_2 \quad (14)$$

Der Anteil der spezifischen Potentialdifferenz beträgt

$$f_2 = 2 \ln \frac{r_H}{r^*} \quad (15)$$

Die zu  $r^*$  gehörende Höhe ist gleich der Mächtigkeit  $M$  (siehe Bild 6).

Werden Gl.(13) und Gl.(14) gleichgesetzt, so wird erhalten

$$\phi_{n \text{ ungesp.}} - \phi_{\text{ungesp.}} = \phi_{n \text{ gesp.}} - \phi_{\text{gesp.}}$$

$$\frac{h_E^2}{2} - \frac{M^2}{2} = (M h_E - \frac{M^2}{2}) - \frac{M^2}{2}$$

Gl.(10a) des Standards

$$h_H = \sqrt{M(2h_E - M)} \quad (16)$$

Zur Abschätzung der Gültigkeit von Gl.(32) und Gl.(33) wird die Größe  $r^*$  ermittelt. Dazu wird Gl.(15) in Gl.(14) eingesetzt.

$$\left( M \cdot h_E - \frac{M^2}{2} \right) - \frac{M^2}{2} = \frac{Q}{4\pi k} 2 \ln \frac{r_H}{r^*}$$

$$\ln \frac{r^*}{r_H} = - \frac{2\pi k M (h_E - M)}{Q}$$

Gl.(11) des Standards

$$r^* = r_H \cdot \exp \left( - \frac{2\pi k M (h_E - M)}{Q} \right) \quad (17)$$

Gl.(32) und Gl.(33) zur Bemessung der H.Br. hat Gültigkeit für die Reichweite  $r_H = 80$  m. Nach Falcke [7] S. 79 wird die Anströmung der Filterstränge nicht nachteilig beeinflusst, wenn die Reichweite

$$r_H \geq 3 \text{ bis } 4 L \quad L = \text{Stranglänge}$$

beträgt.

Falcke hat diese Untersuchung im Zusammenhang mit der Begründung der Größe der Reichweite für sein Sektormodell durchgeführt. Diese Feststellung wird für die Aussage über den Gültigkeitsbereich der Gl.(32) und Gl.(33) bei Vorhandensein von gespanntem Grundwasser genutzt. Somit gilt: Beträgt  $r^*$  gleich 80 m oder ist  $r^*$  gleich oder größer als  $4 L$ , so haben Gl.(32) und Gl.(33) voll Gültigkeit.

Dies lautet in Formeln geschrieben:

Gl.(12) des Standards

$$N = \text{Min}(r_H, 4 L) \quad (18)$$

Das bedeutet:

$$\text{Ist } r_H < 4 L, \text{ dann ist } N = r_H$$

$$\text{Ist } 4 L < r_H, \text{ dann ist } N = 4 L$$

$N$  ist Hilfsgröße

Wenn gilt

$\frac{r_N}{N} \geq 1$ , so ist die Bedingung - ungespanntes Grundwasser im Bereich N vorhanden - für die Anwendung von Gl.(13) und Gl.(14) des Standards erfüllt.

$\frac{r_N}{N} < 1$ , so ist in dem Bereich N gespanntes Grundwasser vorhanden. Die Ergebnisse nach Gl.(13) und Gl.(14) des Standards sind nur als Näherungslösung zu werten.

Die Gl.(13) und Gl.(14) des Standards sind nicht mehr gültig, wenn

$$s_0 < h_n - M$$

wird.

### 2.1.2. Horizontalfilterbrunnen

Offerhaus [22], S. 34 der über 80 Horizontalfilterbrunnen der BRD untersuchte, stellte fest: "Von allen bisher aufgestellten Formeln läßt sich nur die Formel von Falcke mit hinreichender Genauigkeit verwenden. Bei 75 % der überprüfaren Fälle gab sie genaue Werte an."

Auf der am 26./27. Okt. 1967 in Magdeburg stattgefundenen Tagung "Horizontalfilterbrunnen" wurde auch zum Ausdruck gebracht, daß das Berechnungsverfahren von Falcke die zuverlässigsten Werte liefert.

Die Bemessungsformel nach Falcke [7], Blatt 13 lautet:

$$Q_N = \beta \cdot k_{FN}^{1/3} \cdot S \cdot \tan \alpha \quad [m^3/s] \quad (19)$$

$$\beta = 0,34 \text{ bis } 0,30 \quad (20)$$

$$S \quad [m], \quad k_{FN} \quad [m/s]$$

Zur Ermittlung der Größe  $\tan \alpha$  wurden von Falcke zwei Bemessungstabeln aufgestellt.

Es gilt:

$$\tan \alpha = f(D'_N, n, L, H) \quad (21)$$

$k_{FN}$  = Durchlässigkeitsbeiwert in der Natur

$k_{FM}$  = Durchlässigkeitsbeiwert bei Modellversuchen

S = Absenkung im Sammelschacht

Die im Standard verwendete Größe  $s_0 \cong S$ .

$D'_N$  = Ersatzdurchmesser der Filterstränge unter Berücksichtigung der Entsandung

Die im Standard verwendete Größe  $r_B \cong \frac{D'_N}{2}$

n = Stranganzahl

L = Stranglänge

H = Mächtigkeit bei ungespanntem Grundwasser

Die im Standard verwendete Größe  $h_n \cong H$

Der Anwendungsbereich für Gl.(19) lautet [7], Blatt 13:

a) Absenkung  $S \cong 0,5 H$

b) Stranghöhe über der Sohle  $h_R$

Bemessungstafel 1 für  $h_R = 0,3 \cdot H$  [12], S. 216

Bemessungstafel 2 für  $h_R = 0,15 H$  [12], S. 217

c) Reibungsbeiwert in den Filtersträngen im Modell und in der Natur  $f_M = f_N = 0,1$

d) Durchlässigkeitsbeiwert  $k_{FN} = 0,314 \text{ cm/s}$

Bei den Modellversuchen verwendete Falcke einen Sand mit  $k_{FM} = 0,07 \text{ bis } 0,1 \text{ cm/s}$ .

Nach dem Modellgesetz gilt

$$k_{FN} = k_{FM} \sqrt{m}$$

Modellmaßstab 1 : m = 1 : 20

$$k_{FN} = 0,07 \sqrt{20} = 0,314 \text{ cm/s}$$

Durch Verwendung von Sanden mit verschiedenen Durchlässigkeitsbeiwerten stellte Falcke die Beziehung

$$Q = C \cdot k_F^{1/3} \quad (22)$$

auf, die Grundlage für Gl.(19) ist.

Folglich gibt  $k_{FN} = 0,314$  cm/s den Durchlässigkeitsbeiwert an, der bei der Ermittlung der Größe  $\tan \alpha$  vorhanden war.

Die Gl.(19) ist für die in der Natur vorkommenden Durchlässigkeitsbeiwerte anwendbar.

e) Reichweite in der Natur  $R_a = 80$  m

Die Reichweite von 400 cm im Modell ergibt unter Beachtung des Modellmaßstabes von 1 : 20  $R_a = 80$  m in der Natur.

Falcke [7], S. 79 schreibt: "Der Rand des Modells beeinflusst den Strömungsvorgang, so daß für die Übertragung der Versuche auf die Natur für den Fall  $R_a \rightarrow \infty$  eine Abminderung der Brunnenleistung um den Faktor

$$\Delta R_a = 0,9 \text{ bis } 0,8 \quad (22a)$$

berücksichtigt werden muß."

Den Faktor  $\Delta R_a = 0,9$  bis  $0,8$  hat Falcke bei der Ermittlung des Beiwertes  $\beta$ , Gl.(20), berücksichtigt.

In Auswertung der Untersuchung der H.Br. der BRD schreibt Offerhaus [22], S. 32: "Setzt man in der Falck'schen Formel  $s^{0,83}$  anstelle von  $s^{1,0}$ , so erhält man beinahe exakte Werte, auch für größere Absenkungen." Falcke hatte in Auswertung seiner Modellversuche die Beziehung

$$Q = C \cdot s^{0,83}$$

aufgestellt, aber nicht in seine Formel eingeführt.

Schlußfolgerung für den Standard:

$s \leq 0,5$  H:

$$Q = C \cdot s^{1,0} \quad (23)$$

$s > 0,5$  H:

$$Q = C \cdot s^{0,83} \quad (24)$$

Der Verfasser nimmt nachstehend eine Verbesserung des Bemessungsverfahrens von Falcke vor. Die Verbesserung bezieht sich auf

- a) die exakte Berücksichtigung der äußeren Randbedingungen des H.Br. und auf die Anwendung des Bemessungsverfahrens auf Verhältnisse mit gespanntem Grundwasser (siehe Abschnitt 2.1.1. der Studie),
- b) auf die Berücksichtigung der Stranghöhe über der Sohle für

$$h_R = (0,15 \text{ bis } 0,70) H$$

bei Verwendung von nur einer Bemessungstafel.

Im Standard geht diese Beziehung in der Form

$$f = f\left(\frac{h_R}{H}\right)$$

ein (siehe Anlage 2/2 des Standards).

Ableitung von Gl.(13) und Gl.(14) des Standards

Ausgehend von den elementaren Beziehungen in der Grundwasserhydraulik

$$Q_N = v_N \cdot F_N, \quad v_N = k_N \cdot J_N$$

N = Natur

M = Modell

unter Berücksichtigung von

$$J_N = J_M$$

$$F_N = m^2 \cdot F_M$$

Modellmaßstab 1 : m

und der Umrechnung des Durchlässigkeitsbeiwertes unter Beachtung des Modellmaßstabes

$$k_N = k_M \sqrt{m}$$

wird erhalten

$$v_N = k_M \sqrt{m} \cdot J_M$$

$$Q_N = v_N \cdot F_N = k_M \cdot \sqrt{m} \cdot J_M \cdot m^2 \cdot F_M$$

$$Q_N = m^{2,5} \cdot k_M \cdot J_M \cdot F_M$$

$$Q_N = m^{2,5} \cdot Q_M, \text{ da gilt: } Q_M = k_M \cdot J_M \cdot F_M$$

Wird der Zahlenwert von m (1 : m = 1 : 20) eingesetzt, so lautet die Gleichung

$$Q_N = 20^{2,5} \cdot Q_M$$

$$Q_N = 12500 Q_M \text{ [cm}^3/\text{s]} \quad (25)$$

Für die Förderleistung des H.Br. im Modell gilt:

$$Q_M = s_{oH M} \cdot \tan \alpha \text{ [cm}^3/\text{s]} \quad (26)$$

Unter Beachtung des Modellmaßstabes ergibt sich

$$\frac{s_{oH N}}{s_{oH M}} = \frac{1 \text{ m}}{5 \text{ cm}} \rightarrow s_{oH M} \text{ [m]} = 5 s_{oH N} \text{ [cm]} \quad (27)$$

Wird Gl.(26) in Gl.(25) unter Berücksichtigung von Gl.(27) eingesetzt, so wird erhalten

$$Q_N = 0,0625 \cdot s_{oH N} \cdot \tan \alpha \text{ [m}^3/\text{s]} \quad (28)$$

In der Schreibweise von Falcke [7], S. 86 lautet Gl.(28):

$$Q_N = 0,0625 \cdot S_N \cdot \tan \alpha$$

Die von Falcke aufgestellte Beziehung in Gl.(22) geht in Gl.(28) ein, und es gilt

$$Q_N = 0,0625 \frac{k_N^{1/3}}{k_N^{1/3}} s_{oH N} \cdot \tan \alpha \text{ [m}^3/\text{s]} \quad (29)$$

Falcke verwendete bei den Modellversuchen zur Ermittlung der Größe  $\tan \alpha$  einen Sand, der eine Durchlässigkeit bei Umrechnung auf Naturverhältnisse von

$k_N = 0,314 \text{ cm/s} = 3,14 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$  besaß (siehe Abschnitt d) des Anwendungsbereiches für Gl. (19) im Abschnitt 2.1.2. der Studie).

Wird  $k_N^{1/3} = (3,14 \cdot 10^{-3})^{1/3} = 0,1465$  im Nenner von Gl.(29) eingesetzt, so ergibt sich

$$Q = 0,43 \cdot k^{1/3} \cdot s_{oH} \cdot \tan \alpha \quad (30)$$

Der Index N ist in Gl.(30) weggelassen.

Die Stranghöhe über der Schle wird berücksichtigt durch Einführung des Beiwertes

$$f = f\left(\frac{h_R}{h_H}\right)$$

Die Bezeichnung f für die Berücksichtigung der Höhenlage der Stränge wählte bereits Offerhaus zur Umrechnung von Verhältniswerten der Förderleistung [22], Anlagen 8 - 10. Damit geht Gl.(30) über in

$$Q = 0,43 \cdot f \cdot k^{1/3} \cdot s_{oH} \cdot \tan \alpha \quad (31)$$

Unter Berücksichtigung von Gl.(23) und Gl.(24) werden Gl.(32) und Gl.(33) erhalten. Gl.(13) und Gl.(14) des Standards

a)  $s_{oH} \leq 0,5 h_H$ :

$$Q = 0,43 \cdot f \cdot k^{1/3} \cdot s_{oH} \cdot \tan \alpha \text{ [m}^3/\text{s]} \quad (32)$$

b)  $s_{oH} > 0,5 h_H$ :

$$Q = 0,43 \cdot f \cdot k^{1/3} \cdot s_{oH} \cdot \tan \alpha \text{ [m}^3/\text{s]} \quad (33)$$

Die Größe  $\tan \alpha$  wird nach Anlage 2/1 des Standards ermittelt.

$$\tan \alpha = f(r_E, n, L, h_H) \quad (34)$$



Die Grafik in Anlage 2/1 ist identisch mit der von Falcke aufgestellten Bemessungstafel 1 für  $h_R = 0,3 H$  [7], Blatt 13.

Es wurde lediglich für den Ersatzdurchmesser des Filterstranges  $D_N$  der Ersatzradius des Filterstranges  $r_E$  eingeführt und die Bezeichnung der Mächtigkeit  $H$  durch die Bezeichnung  $h_H$  ersetzt.

Bestimmung des Beiwertes  $f$  in Gl.(13) und Gl.(14) des Standards

Falcke [7], Blatt 10, Abb. 12 dargestellte Versuchsauswertung ist in Bild 7 wiedergegeben.

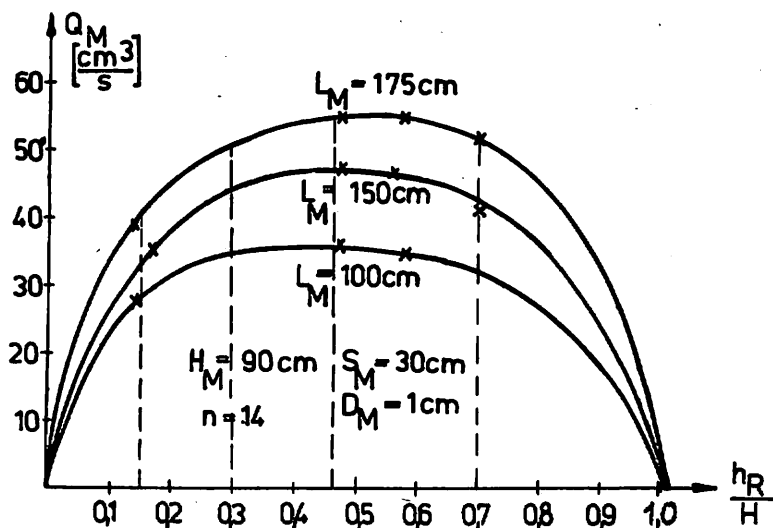


Bild 7  
 $Q_M = f(h_R/h_H)$   
 (nach Falcke)

Zur Bestimmung des Beiwertes  $f$  wird in Tabelle 2 in Abhängigkeit von der Stranglänge  $L_M$  und der Größe  $h_R/H$  die Förderleistung  $Q_M$  aus Bild 7 eingetragen. Mit  $h_R/H = 0,15$  bis  $0,70$  wurde der Bereich ausgewählt, der durch die Meßwerte eingegrenzt wird.

Der Beiwert  $f$  wird in Tabelle 2 wie folgt ermittelt:

$$f = \frac{Q_M = f(L_M, h_R/H)}{Q_M = f(L_M, h_R/H=0,3)}$$

Tabelle 2

$L_M$ [cm]	$h_R/H$							
	0,15		0,30		0,46		0,70	
	$Q_M$	$f$	$Q_M$	$f$	$Q_M$	$f$	$Q_M$	$f$
175	40	0,78	51	1,0	55	1,08	52	1,02
150	34	<u>0,76</u>	45	<u>1,0</u>	48	<u>1,07</u>	42	<u>0,93</u>
100	28	0,62	35	1,0	36	1,03	32	0,92

$Q_M$  [cm<sup>3</sup>/s]

Werden die von Falcke aufgestellten Bemessungstafeln (Bemessungstafel 1 für  $h_R/H = 0,3$ , Bemessungstafel 2 für  $h_R/H = 0,15$ ) miteinander verglichen, so sind nur Unterschiede zwischen den Kurvenscharen für die Stranglänge  $L$  vorhanden (siehe [12], S. 216/217). Für  $h_R/H = 0,3$  wurde  $f = 1,0$  festgelegt. Die durchgeführte Vergleichsrechnung ergibt für  $h_R/H = 0,15$  (Bemessungstafel 2)

für  $L = 10$  m den Beiwert  $f = 0,85$  und

für  $L = 20$  bis  $50$  m den Beiwert  $f = 0,76$ .

Für Anlage 2/2 des Standards gilt:

	$h_R/h_H$	0,15	0,30	0,46	0,70
f	L = 10 m	0,85	1,0	1,07	0,93
	L = 20 bis 50 m	0,76			

Bemessung bei sehr großen Grundwassermächtigkeiten

Die hydraulische Bemessung, der Horizontalfilterstränge kann unmittelbar nach Anlage 2/1 des Standards für  $h_H = 5$  bis 40 m vorgenommen werden. Sollte als Ausnahmefall eine Bemessung für  $h_H > 40$  m durchzuführen sein, so kann dies auf der Grundlage von der in Anlage 2/1 angegebenen Beziehung erfolgen.

$$Q = C \cdot H^{0,43} \quad (35)$$

Diese Gleichung stellte Falcke [7], S. 78 in Auswertung der Modellversuche auf. Ausgehend von Gl.(35) kann geschrieben werden

$$\frac{Q_{H1}}{Q_{H2}} = \frac{H_1^{0,43}}{H_2^{0,43}} \quad (36)$$

wenn erfüllt ist, daß C für  $H_1$  und  $H_2$  den gleichen Wert besitzt. Dies ist gegeben, wenn bei der Umrechnung folgende Größen konstant bleiben:

- Beiwert f bzw. Größe  $h_R/H$  (nach Standard  $h_R/h_H$ )
- Durchlässigkeitsbeiwert k
- Absenkung S (nach Standard  $s_{oH}$ )
- Stranglänge L
- Stranganzahl n
- Ersatzdurchmesser der Filterstränge  $D_N^1$  (nach Standard Ersatzradius  $r_E$ )

Bei Verwendung der Symbole des Standards wird Gl.(36) in der Form

$$Q_{H1} = \frac{h_H 1^{0,43}}{h_H 2^{0,43}} \cdot Q_{H2} \quad (36a)$$

geschrieben.

Bei der Bemessung für  $h_H > 40$  m wird zunächst Q für  $h_H = 40$  m bestimmt und anschließend wird die Umrechnung auf den gewünschten Wert  $h_H$  vorgenommen. So ergibt sich für Gl.(36a)

$$Q_{h_H} = \frac{1}{40^{0,43}} h_H^{0,43} \cdot Q_{h_H = 40 \text{ m}}$$

$$Q_{h_H} = 0,205 \cdot h_H^{0,43} \cdot Q_{h_H = 40 \text{ m}} \quad (37)$$

### 2.1.3. Kontrolle der vorhandenen Förderleistung des Horizontalfilterbrunnens

Bei dem Vergleich der errechneten mit der vorhandenen Förderleistung des Horizontalfilterbrunnens ist das Bekanntsein des Wasserstandes  $h_E$  des Ersatzbrunnens von Bedeutung. Die Größe  $h_E$ , die nach Gl.(7), Gl.(9) und Gl.(10) des Standards ermittelt wird, kann in Grundwasserbeobachtungsrohren, die auf der Kontur des Ersatzbrunnens ( $r_H = 80$  m) errichtet werden, eingemessen werden.

Daher sind von der Brunnenachse aus in einer Entfernung von  $r_H = 80$  m 4 Grundwasserbeobachtungsrohre im Winkel von  $90^\circ$  zueinander versetzt anzuordnen, zwei davon in Grundwasserfließrichtung.

Diese Beobachtungsrohre können bereits zur Ermittlung der für die Berechnung der Förderleistung Q erforderlichen Werte  $h_H$  genutzt werden (siehe im Berechnungsbeispiel 3 Bild 6).

## 2.2. Spülmenge

Beim Vortrieb fließt das Wasser zum Vortriebskopf, gelangt in Wasser-Erdstoff-Gemisch durch diesen über das Entsandungsrohr in den Brunnenschacht. Für die rechnerische Erfassung wird folgende Aufteilung dieses Vorganges vorgenommen (Bild 8):

- Die Strömung des Wassers zum Vortriebskopf
- Der Eintritt des Wasser-Erdstoff-Gemisches in den Vortriebskopf und Durchfluß durch das Entsandungsrohr

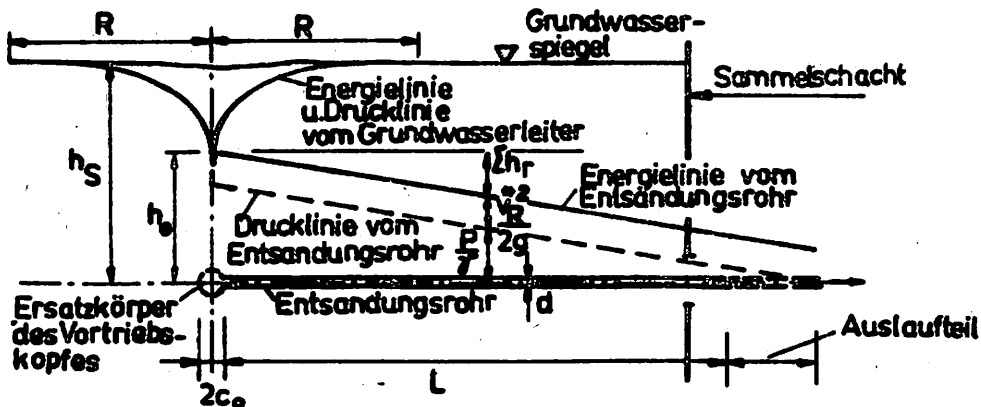


Bild 8 Druck- und Geschwindigkeitsverhältnisse beim Vortrieb

Nach [28], S. 108 gilt für die dem Vortriebskopf zufließende Wassermenge (Spülmenge):

$$Q_{Sp} = \frac{4\sqrt{k} \cdot (h_3 - h_0)}{\frac{1}{c_0} - \frac{1}{R}} \quad (38)$$

$h_3$  = hydrostatische Druckhöhe über der Vortriebsachse

$h_0$  = außen am Vortriebskopf vorhandene Druckhöhe in Höhe der Vortriebsachse während des Eintrittes der Spülmenge  $Q_{Sp}$

$c_0$  = Radius des kugelförmigen Ersatzkörpers des Vortriebskopfes

$R$  = Reichweite

Der Kugelradius  $c_0$  wird errechnet, indem die Kugeloberfläche  $F_K$  gleich der mit Schlitz versehenen Oberfläche des Vortriebskopfes  $F_b$  gesetzt wird.

$$F_K = 4 \cdot \pi \cdot c_0^2$$

$$F_b = 2000 \text{ cm}^2 \text{ beim Vortriebskopf nach [8]}$$

$$c_0 = \sqrt{\frac{2000}{4\pi}} = 12,6 \text{ cm}$$

Wegen des geringen Einflusses der Reichweite wird  $R = \infty$  gesetzt [28], S. 113.

Mit  $c_0 = 0,126 \text{ m}$  und  $R = \infty$  ergibt sich für Gl.(38)

$$Q_{Sp} = \frac{4\sqrt{k} \cdot (h_3 - h_0)}{7,93} \quad (39)$$

Am Ende des Auslaufteiles, wo das Wasser-Erdstoff-Gemisch in den Sammelschacht austritt, ist  $\frac{v}{g} = 0$  und die Gesamtenergie ergibt sich nach der Bernoulli-Gleichung zu

$$h_0 = \frac{v_R^2}{2g} + \sum h_r \quad (40)$$

Die Summe der Reibungsverluste wird ausgedrückt durch

$$h_r = \frac{v_R^2}{2g} \cdot K$$

$$v_R = \frac{Q_{Sp}}{F}, \quad F = \frac{d^2 \cdot \pi}{4}$$

$d = 0,047 \text{ m}$  (Entsandungsrohrdurchmesser)

Bei Einsetzen dieser Größen in Gl.(40) wird erhalten

$$h_o = 1,69 \cdot 10^4 Q_{Sp}^2 (1 + K) \quad [m] \quad (41)$$

Die Größe  $K$  ergibt sich nach [28], S. 115 zu

$$K = 0,88 + 0,70 L \quad (42)$$

Durch Einsetzen von Gl.(41) in Gl.(39) unter Berücksichtigung von Gl.(42) wird erhalten

$$Q_{Sp}^2 + \frac{7,93}{4 \cdot 1,69 \cdot 10^4 (1,88 + 0,70 L)} \frac{1}{k} Q_{Sp}^2 - \frac{1}{1,69 \cdot 10^4 (1,88 + 0,70 L)} h_S = 0$$

oder

$$Q_{Sp}^2 + 2 \cdot 10^{-4} Q_{Sp}^2 - 3,167 \cdot 10^{-4} h_S = 0 \quad (43)$$

Die theoretische Spülmenge wird erhalten zu

Gl.(15) und Gl.(16) des Standards

$$Q_{Sp}^2 = -\frac{C}{K} + \sqrt{\left(\frac{C}{K}\right)^2 + 3,167 \cdot 10^{-4} h_S} \quad [m^3/s] \quad (44)$$

mit

$$C = \frac{10^{-4}}{10,062 + 3,755 L} \quad (45)$$

$k \left[\frac{m}{s}\right]; h_S, L [m]$

Bei der Ableitung von Gl.(44) und Gl.(45) wurde zugrunde gelegt

- Innendurchmesser des Entsandungsrohres 47 mm
- Reibungsbeiwert im Entsandungsrohr  $\lambda = 0,033$   
(absolute Rauigkeit des Entsandungsrohres  $k = 0,24$  bis  $0,31$  mm)
- Ersatzradius des Vortriebskopfes 126 mm

Über weitere getroffene Annahmen siehe [28], S. 107 - 115

Die Gl.(44) und Gl.(45), die für ungespanntes Grundwasser abgeleitet sind, können aber auch näherungsweise bei gespanntem Grundwasser zur Anwendung kommen. Die Begründung dafür ist:

- Bei der kugelförmigen Anströmung ist ein relativ hoher Druckverlust in Nähe des Vortriebskopfes zu verzeichnen.
- Die Mächtigkeit der grundwasserführenden Schicht  $M$  bei gespanntem Grundwasser ist, wenn ein H.Br. geplant ist, relativ groß.

Die theoretische Spülmenge  $Q_{Sp}^*$  nach Gl.(44) und Gl.(45) ist in den Anlagen 3/1 bis 3/4 des Standards graphisch dargestellt. Durch Anwendung der Anlagen wird der Rechenaufwand bei der Bemessung von Horizontalfilterbrunnen wesentlich gemindert.

Bei kleinen Geschwindigkeiten  $v_R$  im Entsandungsrohr und grober Körnung des im Entsandungsrohr zu transportierenden Wasser-Erdstoff-Gemisches setzt sich Erdstoff ab und verkleinert den Durchflußquerschnitt, so daß die Spülmenge  $Q_{Sp} < Q_{Sp}^*$  wird.

Es gilt

Gl.(17) des Standards

$$Q_{Sp} = \beta \cdot Q_{Sp}^* \quad (46)$$

Der Beiwert  $\beta$  wird angegeben in Abhängigkeit von der theoretischen Geschwindigkeit  $v_R^*$  des

Wasser-Erdstoff-Gemisches im Entsandungsrohr und der Sinkgeschwindigkeit  $v_s$  von Erdstoffkörnern in einem stehenden Gewässer.

$$\beta = f \left( \frac{v_R^*}{v_s} \right) \quad (47)$$

Die theoretische Geschwindigkeit im Entsandungsrohr wird aus der theoretischen Spülmenge  $Q_{Sp}^*$  und der Durchflußfläche des Entsandungsrohres von  $17,35 \text{ cm}^2$  (Durchmesser 47 mm) bestimmt.

$$v_R^* = \frac{Q_{Sp}^*}{17,35} \quad [\text{cm/s}]$$

Gl.(18) des Standards

$$v_R^* = 0,0576 \cdot Q_{Sp}^* \quad [\text{cm/s}] \quad (48)$$

Aus Tabelle 3 des Standards wird die Sinkgeschwindigkeit  $v_s$  in Abhängigkeit von der Korngröße bei 50 % Siebdurchgang des Spülgutes (Erdstoff des Wasser-Erdstoff-Gemisches, das über das Entsandungsrohr abgeleitet wird) abgelesen. Diese Korngröße wird als  $d_{50 \text{ u}}$  bezeichnet. Die Werte von Tabelle 3 sind aus [20], S. 46/47 entnommen.

Die Korngrößenverteilung des Spülgutes und damit  $d_{50 \text{ u}}$  ist in der Projektierungsphase nicht bekannt, und es existiert auch keine Berechnungsmethode, nach der  $d_{50 \text{ u}}$  ermittelt werden kann.

Ausgehend von  $d_{50}$  des Erdstoffes des Grundwasserleiters in der Vortriebsebene und der Schlitzweite  $u$  im Vortriebskopf (Korngröße des Größtkornes des Spülgutes  $\leq u$ ) wird in grober Näherung geschrieben

Gl.(19) des Standards

$$d_{50 \text{ u}} = \frac{\text{Siebdurchgang bei } d_x = u \text{ in } [\%]}{100 \%} d_{50} \quad (49)$$

Bei der Aufstellung von Gl.(49) ist der Siebdurchgang bei  $d_x = u$  in [%] des Grundwasserleiters gleich 100 % des Siebdurchganges vom Spülgut gesetzt.

Die quantitative Erfassung von Gl.(47) erfolgt durch Auswertung der Versuchsergebnisse über die Spülmenge in Abhängigkeit von der Druckhöhe [28], S. 112, (siehe Tabelle 3):

Tabelle 3

Druckhöhe im Versuch [m]		2,5	3,0	3,6	4,2	4,8	6,2
nach Bild 78 in [28] S. 112	$q_1 \text{ Vers. } [1/s]$	1,6	2,6	3,5	4,3	4,9	6,00
	$q_1 \text{ Vers.theor. } [1/s]$	3,05	3,50	4,00	4,50	5,00	6,00
	$\beta = \frac{q_1 \text{ Vers.}}{q_1 \text{ Vers.theor.}}$	<u>0,525</u>	<u>0,74</u>	<u>0,875</u>	<u>0,95</u>	<u>0,98</u>	<u>1,00</u>
	$v_R^* = 0,0576 \cdot q \text{ Vers.theor.}$	176	202	230	259	288	346
	$v_s \text{ [cm/s]}$	7,42					
	$\frac{v_R^*}{v_s}$	<u>23,7</u>	<u>27,2</u>	<u>31,0</u>	<u>34,9</u>	<u>38,8</u>	<u>46,6</u>

Die Größen  $q_1 \text{ Vers.}$  und  $q_1 \text{ Vers.theor.}$  sind Bezeichnungen aus [28], S. 112. Es entsprechen  $q_1 \text{ Vers.}$  der Größe  $Q_{Sp}$  nach Gl.(46) und  $q_1 \text{ Vers.theor.}$  der Größe  $Q_{Sp}^*$  nach Gl.(44) und Gl.(45). Die Größe  $v_R^*$  wird analog Gl.(48) ermittelt.

Bestimmung der Sinkgeschwindigkeit  $v_s$  in Tabelle 3:

Nach Gl.(49) ergibt sich für die verwendeten Größen im Versuch  $d_{50} = 0,73 \text{ mm}$ ,  $u = 12 \text{ mm}$  und einen Siebdurchgang bei  $d_x = 12 \text{ mm}$  von 98 %

$$d_{50 \text{ u}} = \frac{98}{100} \cdot 0,73 = 0,71 \text{ mm} \xrightarrow{\text{Tabelle 3 des Standards}} v_s = 7,42 \text{ cm/s}$$

Tabelle 2 des Standards ist durch Interpolieren und Extrapolieren der Werte von  $v_R^* / v_s$  und  $\beta$  aus Tabelle 3 aufgestellt worden.

### 2.3. Stützfilter

Der Stützfilter ist der durch den Entzug von Erdstoff veränderte, durch eine natürliche Kornabstufung gekennzeichnete Bereich um das vorgetriebene Rohr. Der Entzug des Erdstoffes erfolgt durch Spülwirkung.

Der Stützfilter ist ein auf natürliche Weise entstandener Filter.

Der auf künstliche Weise eingebrachte Filter, z.B. nach dem Preusag-Verfahren wird analog zum Vertikalbrunnen als "Kiesfilter" bezeichnet.

Bei suffosionssicherem Erdstoff besteht der Stützfilter (Bild 9) aus

- einem Bereich der natürlichen Kornabstufung unmittelbar am Filterrohr von nur geringem Ausmaß (Bereich I) und
- einem daran anschließenden Bereich, in dem der Erdstoff gestört ist, eine Verschiebung erfährt und die Korngrößenverteilung unverändert bleibt (Bereich II).

Bei suffosionsgefährdetem Erdstoff besteht der Stützfilterquerschnitt neben den o.g. Bereichen I und II aus einem Bereich III, in dem die feinen Fraktionen (Skelettfüllung) aus dem Porenraum

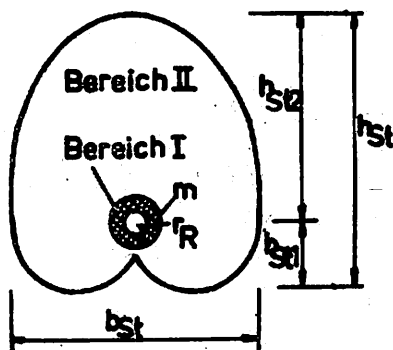


Bild 9  
Stützfilterquerschnitt bei  
suffosionssicherem Erdstoff

des Erdstoffes (Erdstoffskelett) ausgespült sind. Der Bereich III schließt sich an den Bereich I an und ist mit dem Bereich II überlagert [28], S. 12 - 16.

Der Nachweis der Suffosionssicherheit wird nach WAPRO 4.04. Bl. 2 vorgenommen.

#### 2.3.1. Äußere Abmessungen des Stützfilters

Um die Gesetzmäßigkeiten des Spülvorganges und die damit verbundenen Erscheinungen in der Nähe des Vortriebskopfes zu erfassen, werden die Komponenten aus

- der Spülkraft, die zum Vortriebskopfmittelpunkt gerichtet ist (kugelförmige Anströmung) und
- der Auftriebskraft, die als Schwerkraft wirkt,

zu einer Resultierenden  $S$  zusammengefasst. In beliebigen Punkten, die in der senkrecht zur Vortriebsachse stehenden Ebene liegen, werden von den Resultierenden  $S$  die Richtungen bestimmt. Aus dieser erhaltenen Schar von Geraden werden Kurven ermittelt, sogenannte "Verschiebungslinien". Der Erdstoff bewegt sich zwischen den Verschiebungslinien zum Vortriebskopf. Die äußere Verschiebungslinie, die gerade noch zum Vortriebskopf führt (Kurve 1 in Bild 10), ist Grundlage für die Ermittlung von  $b_{St}^* / 2$  und  $h_{St}^* 1$  [28], S. 16 - 25.

Nach diesem beschriebenen Berechnungsablauf wurden die für die Stützfilterberechnung erforderlichen Werte ermittelt und in Anlage 4 des Standards dargestellt.

Bei der Ermittlung der Breite  $b_{St}^*$  ist die Vortriebsgeschwindigkeit mit  $v_v = 0$  angenommen, liegt die Entsandungsweise 1 zugrunde (siehe Abschnitt 2.5.2.) und ist keine Abminderung für

die zusätzlich erforderliche Spülkraft zum Lösen der Körner aus dem natürlichen Kornverband berücksichtigt. In Gl.(20) des Standards ist dies berücksichtigt durch

$$\frac{b_{St}}{2} = 0,7 \cdot \frac{b_{St}^*}{2} \quad (50)$$

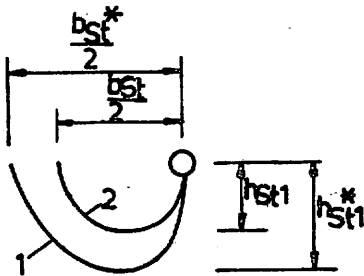


Bild 10  
Detail vom Stützfilterquerschnitt

Die obere Begrenzung des Stützfilterquerschnittes wurde in Auswertung der von Loos und Breth durchgeführten Versuche zur Bemessung von Stollen ermittelt. Der obere Abschluß des Stützfilters (Bild 9) hat in Auswertung der Ergebnisse von Spang die Form einer Ellipse [28], S. 25 - 27.

Es wird bei der Ermittlung der Stützfilterhöhe  $h_{St}$  davon ausgegangen, daß der durch die Entfernung des Erdstoffes (Spülgutes) entstandene Hohlraum voll durch den infolge der Spülkraft gelösten Erdstoff in aufgelockertem Zustand ausgefüllt wird.

Bei der rechnerischen Erfassung wird der Stützfilterquerschnitt durch die Ersatzfläche  $b_{St}^* \cdot h_{St}^*$  (Bild 11) ersetzt und eine gleichmäßige Auflockerung - ausgedrückt durch die Differenz des Porenanteils zwischen der lockeren Lagerung  $n_{II}$  und der natürlichen Lagerung  $n_n$  - über den gesamten Stützfilterquerschnitt zugrunde gelegt [28], S. 27. Es wird erhalten Gl.(21) des Standards

$$h_{St}^* = \frac{m_{Sp}}{f_s \cdot b_{St} (n_{II} - n_n)} \quad (51)$$

$f_s = 2,65 \text{ t/m}^3$

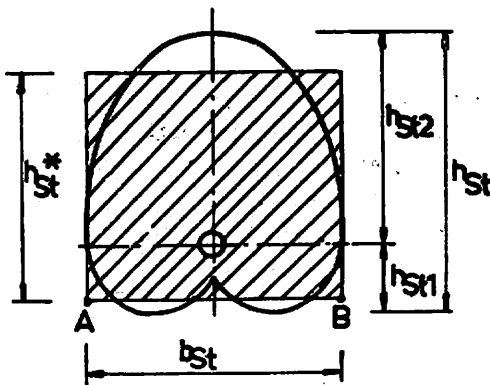


Bild 11  
Ersatzfläche des Stützfilterquerschnittes und äußere Abmessungen des Stützfilterquerschnittes

Über die Größe der Differenz des Porenanteils ( $n_{II} - n_n$ ) liegen keine wissenschaftlich fundierten Aussagen vor. Der Ausdruck ( $n_{II} - n_n$ ) in Gl.(51) kann nach Anlage 5 des Standards ermittelt werden. Die Anwendung von Anlage 5 ist im Berechnungsbeispiel 3, Algorithmus Nr. 7 und Tabelle 3 erläutert. Die Anlage 5 ist auf der Grundlage von Erfahrungen aufgestellt. Die zur Konstruktion der äußeren Abmessungen des Stützfilterquerschnittes vorzunehmenden Schritte sind im Abschnitt 2.3.1. des Standards angegeben.

2.3.2. Dicke der natürlichen Kornabstufung

Zur Ermittlung des Stützfilteraufbaues sind Modellversuche mit einem sandigen Kies durchgeführt worden [28], [25]. Von den nach dem Vortrieb in der Vertikalachse des Stützfilters entnommenen Erdstoffproben ist die wirksame Korngröße  $d_w$  ermittelt worden. Die Größe  $d_w$  im halblogarithmischen Maßstab aufgetragen ergibt bei genügend großer Spülintensität, wenn von wenigen Ausnahmen abgesehen wird, am Filterrohr eine Gerade mit konstanter Neigung (Bild 12), so daß für das verwendete Versuchsmaterial die

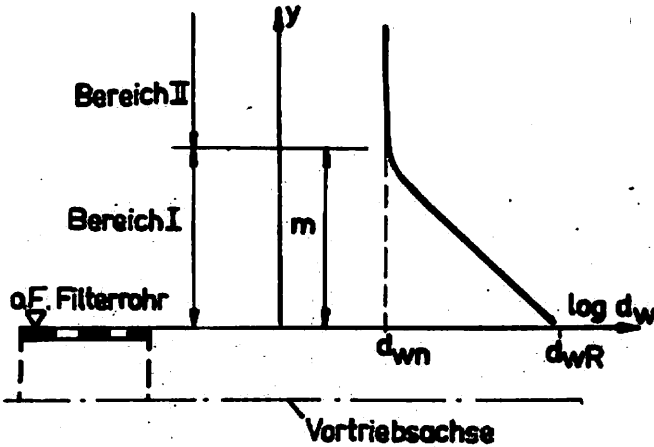


Bild 12  
Natürliche Kornabstufung in Bereich I des Stützfilters

Funktion

$$y = 15,7 \ln \frac{C}{d_w} \quad C \approx d_{wR} \quad (52)$$

aufgestellt werden kann [28], S. 51. Ist die am Filterrohr vorhandene wirksame Korngröße  $d_{wR}$  bekannt, so ist Gl.(52) eindeutig bestimmt. Über die Beziehung zwischen  $C$  und  $d_{wR}$  siehe [28], S. 51.

Es werden folgende Annahmen getroffen:

- Die für das Versuchsmaterial gefundene Gesetzmäßigkeit der natürlichen Kornabstufung nach Gl.(52) ist für die Sande und Kiese der Grundwasserleiter unabhängig von ihrer Korngrößenverteilung bei hinreichend großer Spülintensität - die zur Einhaltung der erforderlichen Sicherheit gegen Versandung ohnehin gewährleistet ist - gültig.
- Bei gleich großer Spülintensität und gleich großer Einwirkungsdauer, die ausgedrückt wird durch die Vortriebsgeschwindigkeit

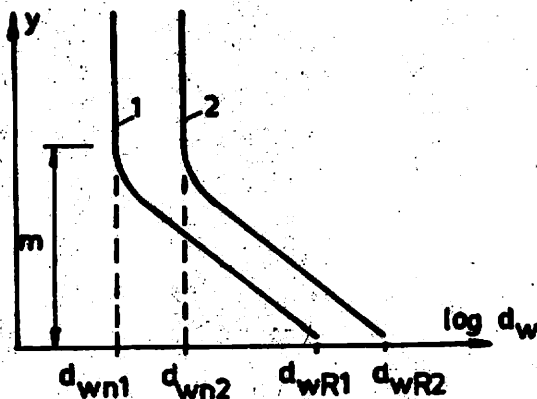


Bild 13  
Beziehung der natürlichen Kornabstufung zwischen zwei Kornmischen



$v_v = \text{const}$ , ist bei Korngemischen mit unterschiedlich großer wirksamer Korngröße  $d_{wn}$  der gleiche Wert der Dicke  $m$  der natürlichen Kornabstufung vorhanden. Nach Bild 13 besteht zwischen dem Korngemisch 1 und dem Korngemisch 2 folgender Zusammenhang:

$$\begin{aligned} \log d_{wR2} &= \log d_{wn2} + (\log d_{wR1} - \log d_{wn1}) \\ \log \frac{d_{wR2}}{d_{wn2}} &= \log \frac{d_{wR1}}{d_{wn1}} \\ \frac{d_{wR2}}{d_{wn2}} &= \frac{d_{wR1}}{d_{wn1}} \end{aligned} \quad (53)$$

Ergibt sich nach Gl.(53) bei relativ gleichförmigen Erdstoff die wirksame Korngröße am Filterrohr  $d_{wR}$  größer als die Schlitzweite  $u$  im Vortriebskopf, so ist zu setzen  $d_{wR} = u$ , denn es muß stets erfüllt sein

$$d_{wR} \leq u \quad (54)$$

Die unter dem Abschnitt b) der Annahmen angeführte Spülintensität wird ausgedrückt durch die Größe  $v_E/v_{kr}$ .

Die Eintrittsgeschwindigkeit  $v_E$  des in den Vortriebskopf eintretenden Wasser-Erdstoff-Gemisches wird aus der Spülmenge  $Q_{Sp}$ , die auf die mit Schlitzen versehene Oberfläche  $F_b$  des Vortriebskopfes bezogen wird, ermittelt.

$$v_E = \frac{Q_{Sp}}{F_b} \quad F_b = 2000 \text{ cm}^2 \text{ beim Vortriebskopf nach [8]} \\ \text{siehe Ableitung von Gl.(39)}$$

Gl.(23) des Standards

$$v_E = 0,0005 Q_{Sp} \left[ \frac{\text{cm}}{\text{s}} \right] \quad Q_{Sp} \left[ \frac{\text{cm}^3}{\text{s}} \right] \quad (55)$$

Die Größe  $v_{kr}$  gibt an, bei welcher Geschwindigkeit die Ausspülung der Körnung durch die Schlitz des Vortriebskopfes beginnt. Die Werte der kritischen Geschwindigkeit  $v_{kr} = f(d_{60}, u)$  werden aus Anlage 6 abgelesen. Über die Ermittlung von  $v_{kr}$  siehe am Ende von Abschnitt 2.3.2. der Studie.

Ausgehend von Bild 12 wird die natürliche Kornabstufung unter Beachtung von Gl.(53) in der Form

$$m = f\left(\frac{d_{wR}}{d_{wn}}\right)$$

dargestellt.

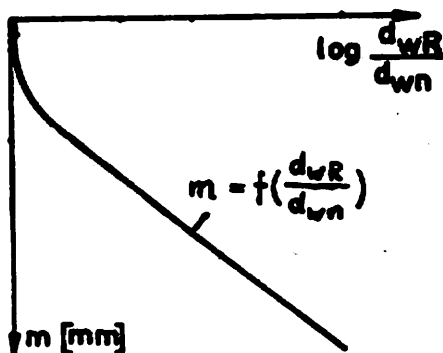


Bild 14  
Dicke der natürlichen  
Kornabstufung

Die Anlage 6 des Standards, nach der die Dicke  $m$  der natürlichen Kornabstufung bestimmt wird,

ist wie Bild 14 aufgebaut. Die Kurve in Anlage 6 ist auf der Grundlage der Versuchsergebnisse [28], S. 56/57, [26], S. 20 bis 23 ermittelt.

Die Bestimmung von  $d_{WR}$  erfolgt unter Anwendung von Gl.(53) und der Ergebnisse aus den Modellversuchen [28]. Es werden die Versuchsreihen 2 und 4 benötigt [28], S. 47.

Versuchsreihe 2 :  $d_{WRM} = f(h_{SM})$  bei  $v_V = 0,4$  m/h

Versuchsreihe 4 :  $d_{WRM} = f(v_V)$  bei  $h_{SM} = 11,5$  m Index M = Modell

Die Beziehung  $d_{WRM} = f(h_{SM})$  wird ersetzt durch  $d_{WRM} = f(v_E/v_{KR})$ .  
 Der Druckhöhe  $h_{SM} = 11,5$  m entspricht  $v_E/v_{KR} = 10,42$ , siehe Tabelle 4.  
 Es gilt:

$$\frac{d_{WRN, v_E/v_{KR}, v_V = 0,4 \text{ m/h}}}{d_{WN}} = \frac{d_{WRM, v_E/v_{KR}, v_V = 0,4 \text{ m/h}}}{d_{WNM}} = C_1$$

$$d_{WRN, v_E/v_{KR}, v_V = 0,4 \text{ m/h}} = C_1 \cdot d_{WNM} \quad (56)$$

und

$$d_{WRN, v_E/v_{KR} = 10,42, v_V} = d_{WRM, v_E/v_{KR} = 10,42, v_V}$$

$$d_{WRM, v_E/v_{KR} = 10,42, v_V} = C_2 \cdot d_{WRM, v_E/v_{KR} = 10,42, v_V = 0,4 \text{ m/h}}$$

$$d_{WRN, v_E/v_{KR} = 10,42, v_V} = C_2 \cdot d_{WRM, v_E/v_{KR} = 10,42, v_V = 0,4 \text{ m/h}} \quad (57)$$

Somit kann für die wirksame Korngröße am Filterrohr bei einer variablen Spülintensität  $v_E/v_{KR}$  und einer variablen Vortriebsgeschwindigkeit  $v_V$  durch Zusammenfassung von Gl.(56) und Gl.(57) geschrieben werden

$$d_{WRN, v_E/v_{KR}, v_V} = C_1 \cdot C_2 \cdot d_{WNM} \quad (58)$$

Gl.(58) lautet in der Schreibweise von Gl.(22) des Standards

$$d_{WR} = C_1 \cdot C_2 \cdot d_{WN} \quad (59)$$

Die Beiwerte  $C_1$  und  $C_2$  sind auf der Grundlage der Modellversuche in den Tabellen 4 und 5 ermittelt. Die Tabellen 4 und 5 des Standards sind durch Interpolation und Extrapolation der Werte von Tabelle 4 und Tabelle 5 der Studie aufgestellt.

Tabelle 4

Versuchsreihe 2, Versuch Nr.	5	6	7	8	9
Druckhöhe im Versuch [m]	2,5	4,8	7,0	11,5	17,0
$Q_{1 \text{ Vers. nach Bild 78 in [28]}}$ $Q_{SP} [\frac{1}{s}]$	1,60	4,90	6,60	9,26	11,95
$v_E = 0,0005 Q_{SP} [\frac{cm}{s}]$	0,80	2,45	3,30	4,63	5,97
$v_E/v_{KR}$	1,80	5,50	7,42	10,42	13,42
$d_w$ nach [28] S. 53 $d_{WRM, v_E/v_{KR}, v_V = 0,4 \frac{m}{h}}$ [mm]	0,82	2,0	2,5	2,8	4,4
$C_1 = \frac{d_{WRM, v_E/v_{KR}, v_V = 0,4 \text{ m/h}}}{d_{WNM}}$	1,52	3,70	4,63	5,18	8,15

Die Größe  $v_{kr}$  wird nach Gl.(63) (Anlage 6 des Standards) für die bei den Modellversuchen vorhandenen Bedingungen  $d_{60} = 1,2$  mm und  $u = 12$  mm erhalten zu  $v_{kr} = 0,445$  cm/s. Die zur Bestimmung von  $C_2$  erforderliche Größe  $d_{wM}$  ist die wirksame Korngröße des Versuchsmaterials und beträgt 0,54 mm [28], Bild 29.

Tabelle 5

Versuchsreihe 4, Versuch Nr.	13	14	8	15
Vortriebsgeschwindigkeit $v_v$ [m/h]	0,1	0,2	0,4	1,2
$d_2$ nach [28], 8.53	$d_{wM, v_v/v_{kr}} = 10,42, v_v$			
$C_2 = \frac{d_{wM, v_v/v_{kr}} = 10,42, v_v}{d_{wM, v_v/v_{kr}} = 10,42, v_v = 0,4 \text{ m/h}}$	1,18	1,07	1,00	0,64

#### Ermittlung der kritischen Geschwindigkeit $v_{kr}$

Die kritische Geschwindigkeit  $v_{kr}$  gibt an, bei welcher Geschwindigkeit die Ausspülung des Erdstoffes des Grundwasserleiters durch die Schlitzse des Vortriebskopfes beginnt. Die hierbei vorhandene Kontaktfläche, die durch die Vortriebskopferoberfläche gebildet wird, liegt in ähnlicher Form zwischen einem feinen und einem groben Erdstoff vor. Die Poren des groben Erdstoffes entsprechen dabei den Schlitzse des Vortriebskopfes. Isaß [13] hat für eine feinkörnige Schicht, die an eine grobkörnige Schicht angrenzt, die Sickergeschwindigkeit ermittelt, bei der der hydraulische Kontaktbruch beginnt. Koslova [17] hat diese Formel auf der Grundlage von mit einigen Erdstoffen durchgeführten Versuchen weiter entwickelt. Für ungleichförmige Erdstoffe gilt (siehe [31], S. 126):

$$v_{kr} = 0,26 d_{60}^2 \left(1 + 1000 \frac{d_{60}^2}{v_{60}^2}\right) \left[\frac{\text{cm}}{\text{s}}\right] \quad (60)$$

$d_{60}, D_{60} [\text{mm}]$

Die Korngröße  $D$  des groben Erdstoffes wird durch die Schlitzweite  $u$  ersetzt. Es besteht unter Anwendung von Gl.(82) folgender Zusammenhang

$$D = 7,25 u \quad (61)$$

Wie bei der Aufstellung von Gl.(60) wird bei dem Ausspülen der Körner als repräsentative Korngröße des Korngemisches die Korngröße bei 60 % Siebdurchgang angesehen.

$$D_{60} = 7,25 u \quad (62)$$

Durch Einsetzen von Gl.(62) in Gl.(60) wird erhalten

$$v_{kr} = 0,26 d_{60}^2 \left(1 + 19 \frac{d_{60}^2}{u^2}\right) \quad (63)$$

In Anlage 6 des Standards ist Gl.(63) grafisch dargestellt.

#### 2.3.3. Einfluß des Stützfilters auf die Förderleistung

Im Stützfilter ist bedingt durch die natürliche Kornabstufung (Bereich I) und die Auflockerung (Bereich II) eine größere Durchlässigkeit vorhanden als im Grundwasserleiter (Bild 9). Die größere Durchlässigkeit bewirkt

- einen größeren radialen Zufluß zum Filterrohr und

- eine Längsströmung im Stützfilter, deren Ausbildung von der Verteilung der Eintrittsgeschwindigkeit längs des Fassungsstranges und der damit im Zusammenhang stehenden Druckverluste im Grundwasserleiter und im Fassungsstrang abhängig ist (siehe Abschnitt 1.1.5. zu Stranglänge und Stranganzahl).

Diese größere Durchlässigkeit im Stützfilter wird bei der Ermittlung der Förderleistung durch Einführung eines sogenannten Ersatzradius  $r'_g$  des Horizontalfilterstranges berücksichtigt.

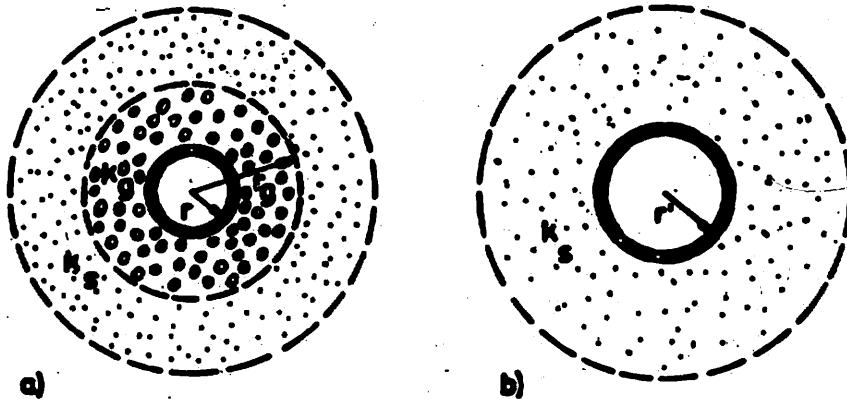


Bild 15 Ermittlung des Ersatzradius  $r'$  nach Falcke

Falcke ermittelte den Ersatzradius für Verhältnisse, wie sie beim Vortrieb nach dem Preußag-Verfahren vorliegen (Bild 15a). In Bild 15a ist ein Kiesfilter mit der Durchlässigkeit  $k_g$  um das Filterrohr vorhanden, während der übrige Bereich die Durchlässigkeit  $k_s$  hat. In Bild 15b ist statt des Kiesfilters ein vergrößerter Filterrohrradius  $r'$  (Ersatzradius) vorhanden, wobei das Filterrohr nur von einem Erdstoff mit der Durchlässigkeit  $k_s$  umgeben ist.

Falcke [7], S. 82 geht bei der Ableitung von Gl.(64) davon aus, daß in beiden der in Bild 15 dargestellten Fälle die gleiche Förderleistung vorhanden ist.

$$r' = r_g \left(1 - \frac{k_s}{k_g}\right) \left(\frac{k_g}{k_s}\right) \quad (64)$$

Der Stützfilterquerschnitt nach Bild 9 wird für die Ermittlung des Ersatzradius  $r'_g$  in Bild 16 idealisiert dargestellt.

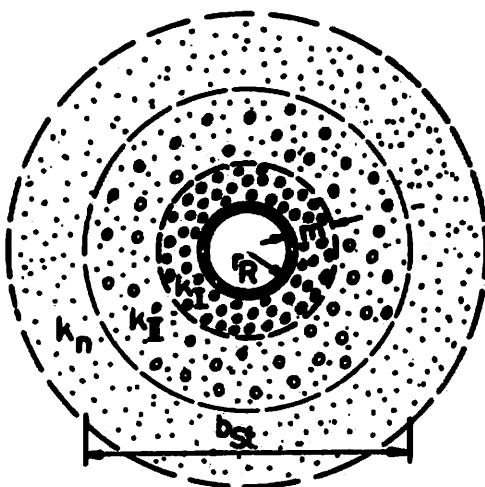


Bild 16  
Idealisierter Stütz-  
filterquerschnitt

Im Gegensatz zu Bild 15a sind im Bild 16 drei Zonen - gekennzeichnet durch  $k_I$ ,  $k_{II}$ ,  $k_n$  - vorhanden. Daher erfolgt die Ermittlung

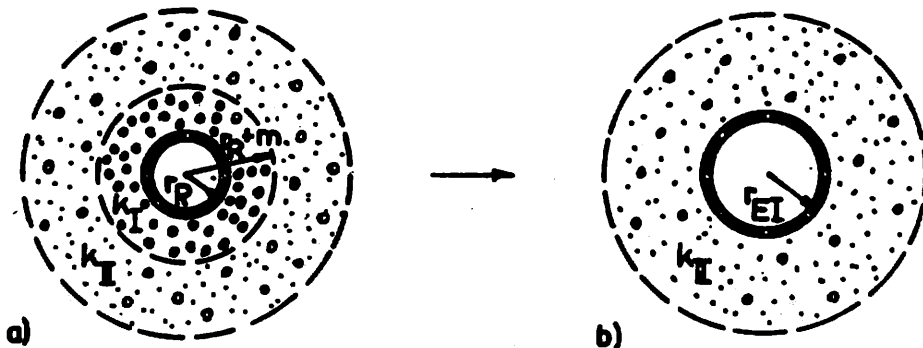


Bild 17 Ermittlung von  $r_{EI}$  im 1. Schritt

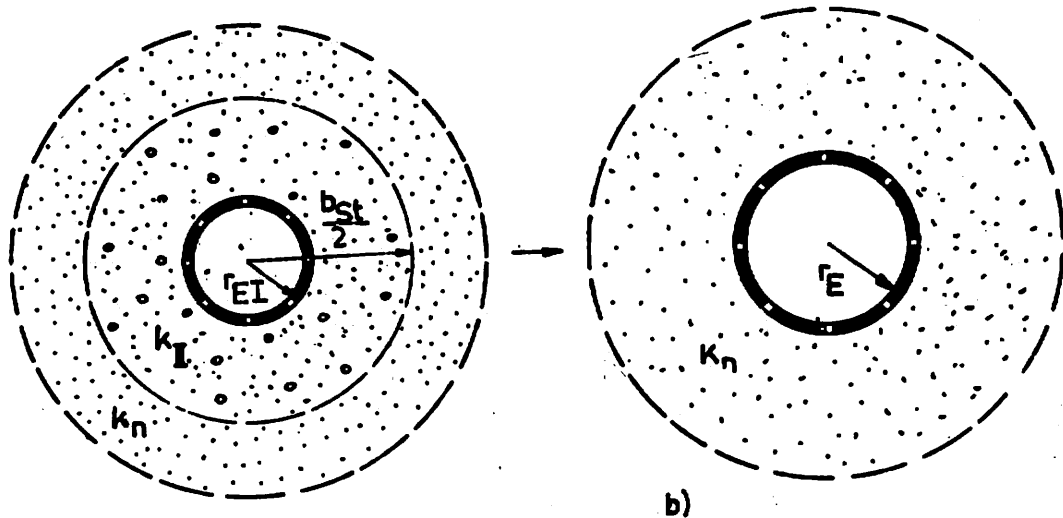


Bild 18 Ermittlung von  $r_E$  im 2. Schritt

von  $r_E$  in zwei Schritten. Im ersten Schritt (Bild 17) wird ausgehend vom Filterrohrradius  $r_R$  und dem Bereich der natürlichen Kornabstufung (Bild 17a) der Ersatzradius  $r_{EI}$  eines im Bereich II eingebetteten Rohres (Bild 17b) errechnet. Im zweiten Schritt (Bild 18) wird von den Verhältnissen im Bild 17b ausgegangen (Bild 18a) und der Ersatzradius  $r_E$  eines mit Erdstoff des Grundwasserleiters von natürlicher Lagerung umgebenen Rohres (Bild 18b) ermittelt.

Ermittlung von  $r_{EI}$  (Bild 17):

Die im Bereich I (Bild 9) vorhandene natürliche Kornabstufung von  $d_{WR}$  (am Filterrohr) bis  $d_{WN}$  (Übergang zum Bereich II) wird ersetzt durch einen Erdstoff mit einer über die gesamte Dicke  $m$  vorhandenen mittleren wirksamen Korngröße  $d_{WI}$ . Bei der Ermittlung von  $d_{WI}$  wird von der in Anlage 7 dargestellten Funktion

$$m = f \left( \frac{d_{WR}}{d_{WN}} \right) \quad (65)$$

ausgegangen.

Es gilt

$$\frac{d_{wR}}{d_{wn}} = f(m) \quad (65a)$$

Die mittlere wirksame Korngröße im Bereich I, der die Dicke  $m$  hat, wird erhalten aus

$$\frac{d_{wI}}{d_{wn}} = \frac{1}{m} \int f(m) dm \quad (66)$$

In Anlage 7 des Standards ist Gl.(66) graphisch dargestellt. Diese Kurve ist in Anlage 7 mit

$$\frac{d_{wI}}{d_{wn}} = F(m)$$

bezeichnet.

Für die Durchlässigkeit gilt

- im Bereich I:  $k_I = C' \cdot d_{wI}^2$   
 - im Bereich II:  $k_{II} = C'' \cdot d_{wn}^2$

Werden näherungsweise der Porenanteil sowie Form und Anordnung der Poren in den zwei Bereichen als gleich angesehen, so gilt  $C' = C''$ , und es kann geschrieben werden

$$\frac{k_{II}}{k_I} = \frac{d_{wn}^2}{d_{wI}^2} = \frac{1}{\left(\frac{d_{wI}}{d_{wn}}\right)^2}$$

Damit wird der Ersatzradius für den 1. Schritt analog zu Gl.(64) erhalten zu Gl.(24) des Standards

$$r_{IE} = (r_R + m)(1-c) \cdot r_R^c \quad (67)$$

Gl.(25) des Standards

$$c = \frac{1}{\left(\frac{d_{wI}}{d_{wn}}\right)^2} \quad (68)$$

Ermittlung von  $r_E$  (Bild 18):

Nach Bild 18 entspricht  $b_{St}/2$  dem Radius  $r_g$ , und  $r_{EI}$  entspricht der Größe  $r$  in Bild 15 und in Gl.(64). Die Größe  $k_g/k_g$  in Gl.(64) wird entsprechend Bild 18 ersetzt durch die Größe  $k_n/k_{II}$ . Der Ersatzradius wird erhalten zu

Gl.(26) des Standards

$$r_E = \left(\frac{b_{St}}{2}\right) \left(1 - \frac{k_n}{k_{II}}\right) \cdot r_{EI} \left(\frac{k_n}{k_{II}}\right) \quad (69)$$

Die Größe  $k_n/k_{II}$  kann ermittelt werden nach Gl.(27) des Standards, siehe in der Studie Abschnitt 1.4., Gl.(4).

#### 2.4. Sicherheit gegen Versandung

Für den vorliegenden Fall der Kontakterosion - beliebige Korngrößenverteilung und schlitzförmige Öffnung - wird die von Čiřtín [6] für nichtbindige Erdstoffe aufgestellte Funktion zugrunde gelegt (Bild 19). Ziemš [31], S. 108 hat im Bereich  $U^I = 1$  bis 4 eine Verbesserung vorgenommen, die sich auf Versuche und theoretische Untersuchungen stützt. Im Bild 19 wird mit den Größen  $d_{50}$  und  $U_d$  die Korngrößenverteilung des feineren Erdstoffes und mit den Größen  $D_{50}$  und  $U_D$  die Korngrößenverteilung des gröbereren Erdstoffes gekennzeichnet.

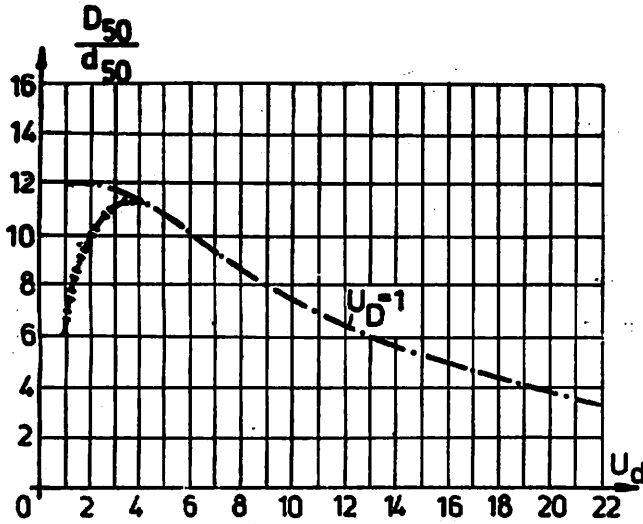


Bild 19  
 Abhängigkeit  $\frac{D_{50}}{d_{50}}$  von  $U_d$   
 bei der Sicherheit  $\eta = 1$   
 - - - - - nach Čištín  
 - - - - - Korrektur nach Ziems

Bei der Anwendung der von Čištín und Ziems aufgestellten Funktion auf die Verhältnisse der Horizontalfilterstränge entspricht der feinere Erdstoff ( $d_{50}$ ,  $U_d$ ) der unmittelbar an das Filterrohr angrenzenden Körnung. Zwischen den Kennwerten des gröberen Erdstoffes ( $D_{50}$ ,  $U_p$ ) und der Filterrohrschlitzweite  $w_s$  ist eine Beziehung herzustellen.

Den Versuchen zur Aufstellung der Funktion im Bild 19 liegt eine Durchströmung senkrecht zur Kontaktfläche von oben nach unten zugrunde, wobei das hydraulische Gefälle bis  $J = 9$  erhöht wurde [6], S. 48. Damit ist die Reduzierung auf ein rein geometrisches Problem voll gerechtfertigt.

Berühren sich in der Kontaktfläche zwei aus kugelähnlichen Körnern bestehende Erdstoffe, so muß zur Verhütung einer Kontakterosion erfüllt sein [31]:

$$d_{\text{ma\ss g}} \cong F \cdot D_{p, \text{ma\ss g}} \quad (70)$$

$d_{\text{ma\ss g}}$  = für die Kontakterosion maßgebende Korngröße des feineren Erdstoffes

$D_{p, \text{ma\ss g}}$  = für die Kontakterosion maßgebender Porenkanaldurchmesser des gröberen Erdstoffes

$F$  = Einflußfaktor, der insbesondere das Schlupfmaß  $F_s$  zwischen der Korngröße  $d_{\text{ma\ss g}}$  und dem Porenkanaldurchmesser  $D_{p, \text{ma\ss g}}$  berücksichtigt

Die maßgebende Korngröße  $d_{\text{ma\ss g}}$  kommt in dem Verhältnis  $\frac{d_{50}}{D_{50}}$ , das im Bild 19 dargestellt ist zum Ausdruck.

Die Gl.(70) kann auch in der Form

$$d_{\text{ma\ss g}} = D'_p \quad (71)$$

dargestellt werden, wobei für Erdstoffe gilt

$$D'_p = F \cdot D_{p, \text{ma\ss g}} \quad (72)$$

Für die Schlitze im Filterrohr wird analog dazu folgender Ansatz vorgenommen:

$$D'_p = F' \cdot D_{p, \text{ma\ss g}} \quad (73)$$

Als maßgebender Porenkanalquerschnitt wird beim Filterrohr die Fläche der Schlitzöffnung angesehen. Die unterschiedliche Form zwischen den Flächen der Schlitzöffnungen und den Porenkanalquerschnitten des Erdstoffes wird beim Filterrohr berücksichtigt, indem geschrieben wird

$$D_{p, \text{ma\ss g}} = F'' \cdot w_s \quad (74)$$

Durch Einsetzen von Gl.(74) in Gl.(73) wird erhalten

$$D_p^i = F' \cdot F'' \cdot w_s \quad (75)$$

$F'$  = Einflußfaktor, der insbesondere das Schlupfmaß in den Filterrohrschlitzen berücksichtigt

$F''$  = Faktor, der die Abweichung der Form der Schlitzfläche von der Form des Porenkanalquerschnittes im Erdstoff berücksichtigt

$w_s$  = Breite der Schlitz im Filterrohr, kurz als Schlitzweite bezeichnet

Der Zusammenhang zwischen dem Porenkanaldurchmesser  $D_{p, \text{maß}}$  im Erdstoff und der Filterrohrschlitzweite  $w_s$  ergibt sich durch Gleichsetzung von Gl.(72) mit Gl.(75).

$$F \cdot D_{p, \text{maß}} = F' \cdot F'' \cdot w_s$$

$$D_{p, \text{maß}} = \frac{F' \cdot F''}{F} w_s \quad (76)$$

Je nach der Lagerungsdichte des Erdstoffes verhält sich die Beziehung zwischen maßgebenden Korndurchmesser  $D_{\text{maß}}$  und  $D_{p, \text{maß}}$ .

Nach Ziems [31], S. 107 gilt für  $U_d = 1$  und  $U_D \cong 1$  (Bild 19)

$$D_{p, \text{maß}} = 0.414 D_{\text{maß}} \quad (77)$$

und

$$F \approx 0,4 \quad (78)$$

Der zwischen zwei rolligen Erdstoffen vorhandene Einfluß der absoluten Korngröße auf den Einflußfaktor  $F$  ist in dem hier vorliegenden Fall (rolliger Erdstoff - Filterrohrschlitze) auf den Einflußfaktor  $F'$  zu beziehen.

Der Einflußfaktor  $F$  bzw.  $F'$  berücksichtigt den erforderlichen Zwischenraum, der für die Bewegung des feineren Kornes vom Durchmesser  $d_{\text{maß}}$  durch die Porenkanäle des größeren Erdstoffes vom Durchmesser  $D_{p, \text{maß}}$  bzw. durch die Filterrohrschlitze erforderlich ist. In den Erdstoffen mit  $U_D = 1$ , und noch mehr in solchen von  $U_D \gg 1$  sind die Porenkanäle relativ krummlinig und folglich lang gegenüber den Filterrohrschlitzen. Bei den Filterrohren gilt als "Porenkanallänge" die Filterrohrwandstärke, die bei den verschiedenen Vortriebsverfahren und Filterrohrmaterial im allgemeinen zwischen 3 und 12 mm liegt. Außerdem ist ein Schlüpfen der Körner in einem schlitzförmigen Porenkanalquerschnitt, wie er bei den Filterrohrschlitzen vorhanden ist, sehr viel leichter möglich als in den näherungsweise kreisförmigen Porenkanalquerschnitten des Erdstoffes. Daher dürfte der Faktor  $F'$  vom Filterrohr im Vergleich zu dem vom Erdstoff (Gl.78) fast die Größe "Eins" erreichen. Es wird

$$F' = 0,90 \text{ bis } 0,95 \quad (79)$$

gesetzt.

Um den Faktor  $F''$  zu bestimmen, müßte eine Umrechnung von schlitzförmigen Öffnungen (die Schlitzlänge beträgt das Mehrfache der Schlitzbreite) auf kreisförmige Öffnungen vorgenommen werden. Eine solche Beziehung ist nicht bekannt. Eine näherungsweise Bestimmung wird durch Umrechnung der Maschenweite von einem Quadratlochsieb mit der Seitenlänge  $a$  eines Quadrates auf ein Rundlochsieb vom Lochdurchmesser  $d$  nach TGL 11464, Bl. 7, S. 4 vorgenommen. Die in der TGL angegebenen Werte werden graphisch aufgetragen. Durch Extrapolierung in Richtung zum Koordinatenursprung ergibt sich für  $a = 5,0$  mm der Durchmesser  $d = 6,6$  mm.

$$F'' = \frac{a}{d} = \frac{6,6}{5,0} = 1,32 \quad (80)$$

Der wirklich vorhandene Wert  $F''$  dürfte bei den Schlitzen noch etwas größer sein als der für quadratische Öffnungen ermittelte Wert von  $F'' = 1,32$ . Das Maß der Abweichungen richtet sich nach dem Ausmaß des Abweichens der Erdstoffkörner von der Kugelform.



Näherungsweise wird der Ausdruck

$$\frac{F'}{F''} = 3 \quad (81)$$

gesetzt.

Wird Gl.(76) unter Beachtung von Gl.(81) mit Gl.(77) gleichgesetzt, lautet der gesuchte Zusammenhang

$$\begin{aligned} 3 \cdot w_B &= 0,414 D_{\text{maß}} \\ D_{\text{maß}} &= 7,25 w_B \end{aligned} \quad (82)$$

Bei dem groben Erdstoff ( $U_D = 1$ ) ist die Korngröße konstant. Es kann daher geschrieben werden

$$D_{\text{maß}} = D_{50} \quad (83)$$

Die Ordinatenwerte  $\frac{D_{50}}{d_{50}}$  von Bild 19 werden im Bild 20 durch den Ausdruck  $\frac{w_B}{d_{50}}$  ersetzt. Zwischen beiden Ausdrücken besteht unter Beachtung von Gl.(82) und Gl.(83) folgender Zusammenhang

$$\frac{D_{50}}{d_{50}} = 7,25 \frac{w_B}{d_{50}} \quad (84)$$

$$\frac{w_B}{d_{50}} = 0,138 \frac{D_{50}}{d_{50}} \quad (84a)$$

Im Bild 20 sind für  $\eta = 1$  die Werte aus Bild 19 entnommen und entsprechend Gl.(84a) mit dem Faktor 0,138 multipliziert. Die Kurven für  $\eta = 1,5$  und  $\eta = 2,0$  werden durch Umrechnung der Kurve  $\eta = 1,0$  erhalten. Die Größen  $d_{50}$  und  $U$  beziehen sich auf den unmittelbar das Filterrohr berührenden Erdstoff. Es werden daher in Bild 20 die Bezeichnungen  $d_{50R}$  und  $U_R$  verwendet.

Die zur Aufstellung einer Grafik für die Ermittlung des Sicherheitsbeiwertes  $\eta$  erforderlichen Werte  $d_{50R}$  und  $U_R$  sind nur von dem Versuchsmaterial der Modellversuche [28], gekennzeichnet durch  $d_{50M}$  und  $U_M$ , bekannt. Es wird daher analog zu der Ableitung von Gl.(53) die Annahme getroffen, daß bei gleich großer Spülintensität  $v_E/v_{KR}$  und gleich großer Einwirkungsdauer des Spülvorganges, die ausgedrückt wird durch die Vortriebgeschwindigkeit  $v_V$  zwischen den Erdstoffkennwerten eines Korngemisches 1 und eines Korngemisches 2 folgender Zusammenhang besteht:

$$\frac{d_{50R2}}{d_{50 2}} = \frac{d_{50R1}}{d_{50 1}} \quad , \quad \frac{U_{R2}}{U_2} = \frac{U_{R1}}{U_1} \quad (85)$$

$$(86)$$

Somit kann geschrieben werden

$$d_{50R} = \frac{d_{50RM}}{d_{50M}} \cdot d_{50} \quad , \quad U_R = \frac{U_{RM}}{U_M} \cdot U \quad (87)$$

$$(88)$$

$d_{50}$ ,  $U$  = Erdstoffkennwerte des Grundwasserleiters

Bedeutung der Indizes:

R = Rohr (Erdstoffkennwert am Filterrohr)

M = Modell (Erdstoffkennwert aus Modellversuchen gewonnen)

Die Werte von  $d_{50RM}$  und  $U_{RM}$  vorhanden als

$$d_{50RM}, v_E/v_{KR}, v_V = 0,4 \text{ m/h} \quad , \quad U_{RM}, v_E/v_{KR}, v_V = 0,4 \text{ m/h}$$

$$d_{50RM}, v_E/v_{KR} = 10,42, v_V \quad , \quad U_{RM}, v_E/v_{KR} = 10,42, v_V$$

werden aus Tabelle 3 in [28], S. 53 entnommen (siehe auch Tabelle 4 und 5 der Studie). Es betragen  $d_{50M} = 0,73$  mm und  $U_M = 4,7$ . Damit können bei Bekanntsein von  $d_{50}$  und  $U$  des Grundwasserleiters die Größen  $d_{50R}$  und  $U_R$  nach Gl.(87) und Gl.(88) bestimmt werden.

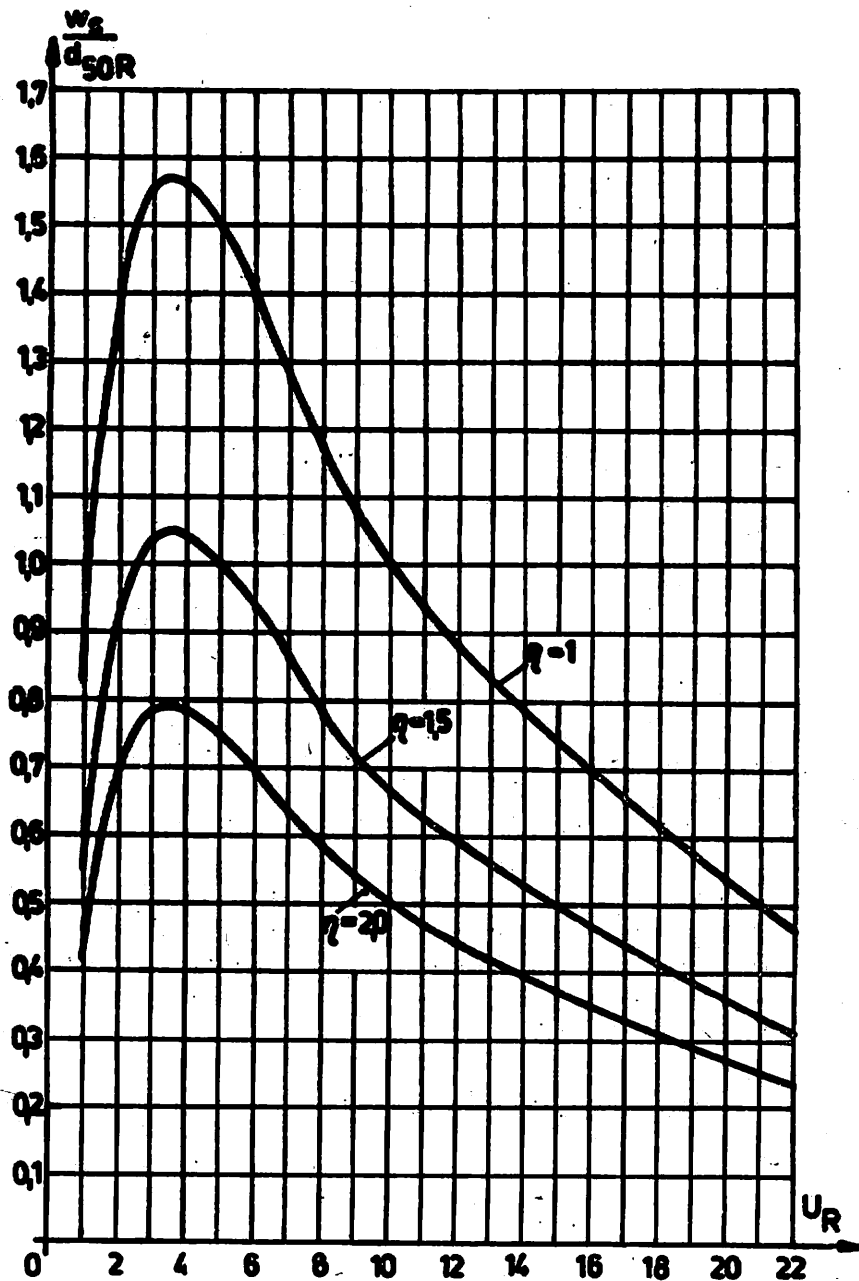


Bild 20  
 Beziehung zwischen Schlitzweite  $w_g$  und den Erdstoffkennwerten  
 am Filterrohr  $d_{50R}$  und  $U_R$  bei verschieden großen Sicherheits-  
 beiwert  $\eta$  gegen Versandung

Der Sicherheitsbeiwert gegen Versandung wird nach Bild 20 ermittelt.

$$\eta = f(d_{50R}, U_R, w_g) \quad (89)$$

Dabei gilt für die Größen

$$d_{50R} = f_1(d_{50}, v_E/v_{KR}, v_V) \quad (90)$$

$$U_R = f_2(U, v_E/v_{KR}, v_V) \quad (91)$$

Die Gl.(89) ist in Anlage 8 des Standards graphisch dargestellt.

Bei der Aufstellung von Gl.(84a) sind eine Reihe von Annahmen getroffen worden. Es ist dringend erforderlich, diese Beziehung durch experimentelle und theoretische Untersuchungen zu überprüfen. Eine weitaus größere Näherung als Gl.(84a) ist, stellen die Gl.(87) und Gl.(88) dar, die die Grundlage für Gl.(89) sind.

## 2.5. Herstellung der Horizontalfilterstränge

### 2.5.1. Filterrohr

Die grundsätzlichen Ausführungen zu der Herstellung, den Kosten, dem Material und den hydraulischen Anforderungen an die Filterrohre der Vertikalbrunnen im WAFRO 1.42. Bl. 3, Abschnitt 1.1. sind auch für die Filterrohre der Horizontalfilterbrunnen gültig.

Hinsichtlich der statischen Beanspruchung werden die Filterrohre wie folgt unterteilt:

a) Das Filterrohr wird in ein vorhandenes Bohrrrohr eingebaut (Fehlmann-Verfahren, Preußag-Verfahren) ähnlich wie beim Vertikalbrunnen.

Es sind bisher Filterrohre mit Langlochschlitzung aus Kupfer, verzinktem Stahl- und Eisenblech, Stahl mit Kunststoffüberzug, Hartgummi, Hagusta, Chromstahl, Chrom-Nickelstahl mit Schlitzweiten  $w_g = 2$  bis 5 mm verwendet worden.

b) Das Filterrohr wird während des Vortriebes als Bohrrrohr benutzt (Ranney-Verfahren).

Es sind bisher Filterrohre mit Langlochschlitzung aus Edelstahl und SM-Stahl mit Schlitzweiten  $w_g = 5$  bis 6 mm verwendet worden.

In der DDR werden Edelstahlfilterrohre, die nach dem Ranney-Verfahren vorgetrieben werden, mit Langlochschlitzung und einer Schlitzweite  $w_g = 5$  mm mit Erfolg verwendet. Von Nachteil ist, daß die Schlitzweite aus herstellungstechnischen Gründen nicht kleiner als 5 mm gewählt werden kann. Es wird in der DDR auf FVC-Filterrohre orientiert, die ebenfalls beim Vortrieb als Bohrrrohr verwendet werden [27], S. 144, [9]. Die FVC-Filterrohre sind sehr viel billiger als die Edelstahlfilterrohre und können jedem für den Vortrieb in Frage kommenden Erdstoff durch entsprechende Wahl der Schlitzweite angepaßt werden.

### 2.5.2. Vortriebstechnologie

Das Vortreiben der Horizontalfilterstränge und die während des Vortreibens vorzunehmende Entsandung beeinflussen sich gegenseitig. Der Vortrieb wird z.B. erleichtert bei einer intensiven Entsandung und die Entsandung ist z.B. umfangreicher bei einer kleineren Vortriebsgeschwindigkeit. Daher ist das Vortreiben und das Entsanden als eine Einheit anzusehen. Die beim Vortrieb und der dabei vorgenommenen Entsandung angewandte Technologie muß zwangsläufig auf die Ausbildung des Stützfilters Einfluß haben.

Die Vortriebstechnologie ist gekennzeichnet durch

a) die Vortriebsweise

- kontinuierlich oder
- abschnittsweise,

b) die Entsandungsweise

in bezug auf den Durchfluß der Spülmenge (Wasser-Erdstoff-Gemisch) durch das Entsandungsrohr

- freier Durchfluß (Entsandungsweise 1) oder
- Erzeugung von Druckstößen in der Spülmenge in frei wählbaren Zeit- oder Vortriebsabständen durch plötzliches Schließen und Öffnen eines im Entsandungsrohr eingebauten Absperrorgans z.B. eines Schnellschlußschiebers (Entsandungsweise 2) oder
- Erzeugung von Druckstößen wie bei Entsandungsweise 2 und außerdem in frei wählbaren Zeit- oder Vortriebsabständen eine stoßweise Einleitung von Preßluft in das Entsandungsrohr (Entsandungsweise 3) und

c) die Vortriebsgeschwindigkeit

Die in Abschnitt 2.3.2. bis 2.4. enthaltenen Berechnungsgrundlagen beziehen sich auf die Entsandungsweise 2 und auf eine kontinuierliche Vortriebsweise.

Zur Aufstellung der Berechnungsgrundlagen in Abschnitt 2.3.2. bis 2.4. sind die Ergebnisse von den Modellversuchen herangezogen worden. Bei den Versuchen wurde bei der Entsandungsweise 2 zur Erzeugung der Druckstöße der Schnellschlußschieber im Wechsel 3 s geöffnet und 2 s geschlossen und bei der Entsandungsweise 3 dazu zusätzlich Preßluft bei geschlossenem Schnellschlußschieber in Abständen von 2 min. jeweils 5 s lang eingeleitet [28], S. 46/47.

In der Regel ist die Entsandungsweise 2 anzuwenden.

In [28], S. 86 ist in Bild 65 für die Entsandungsweisen 1 bis 3 der Sicherheitsbeiwert  $\eta$  in Abhängigkeit von der Druckhöhe im Versuch  $h_{St}$   $v$  dargestellt. Für  $h_{St}$   $v < 2,7$  m ergibt sich

$$\eta \text{ Entsandungsweise 1} > \eta \text{ Entsandungsweise 2}$$

Daher ist für  $h_{St}$   $v < 2,7$  m die Entsandungsweise 1 anzuwenden.

Nach Bild 78 in [28], S. 112 wird für  $h_{St} = 2,7$  m die Größe  $q_1$  Vers., theor. = 2,9 l/s erhalten (nach Schreibweise des Standards  $Q_{Sp}^n = 2,9$  l/s). Unter Anwendung von Gl.(48) wird für  $Q_{Sp}^n = 2,9$  l/s und  $v_s = 7,42$  cm/s (siehe Tabelle 3) erhalten  $v_R^n/v_s = 22,5$ .

Das heißt für

$$\frac{v_R^n}{v_s} \leq 20 \text{ bis } 25 \quad (92)$$

ist die Entsandungsweise 1 anzuwenden, sofern die erforderliche Sicherheit gegen Versandung bei solchen kleinen Spülmengen  $Q_{Sp}$  noch erreicht wird und ein Vortrieb überhaupt noch möglich ist.

Die Entsandungsweise 3 sollte nur zur Anwendung kommen, wenn Schwierigkeiten (zu große Pressenkräfte) beim Vortrieb auftreten und Gefahr besteht, daß die vorgesehene Vortriebslänge nicht erreicht wird.

Bei einer mittleren Spülwirkung und sonst gleichen Bedingungen ist die Spülgutmenge  $m_{Sp}$  bei Anwendung

- der Entsandungsweise 1 klein
- der Entsandungsweise 2 von mittlerer Größe
- der Entsandungsweise 3 sehr groß.

Die Spülgutmenge  $m_{Sp}$  ist kein ausreichendes Kriterium für eine bestimmte zu erreichende Sicherheit gegen Versandung  $\eta$ .

Von einer bestimmten Spülgutmenge ab ist die Steigerung von  $\eta$  sehr klein im Verhältnis zu der Erhöhung der Spülgutmenge [28], S. 92.

Eine Vergrößerung von  $\eta$  wird bei gleicher Spülmenge  $Q_{Sp}$  durch Variieren der Eintrittsgeschwindigkeit  $v_E$  erreicht, indem der Vortriebskopf in einen Vortriebsabschnitt und in einen Nachentsandungsabschnitt unterteilt wird [28], S. 117 - 125, S. 131, [27], S. 146. Dies ist in den Berechnungsgrundlagen unter Abschnitt 2. nicht berücksichtigt.

Ist die während des Vortriebes im Sammelschacht anfallende Spülmenge  $Q_{Sp}$  zu messen, so ist während dieser Zeit die Entsandungsweise 1 anzuwenden, denn bei der Ermittlung der Spülmenge (Abschnitt 2.2.) ist ein kontinuierlicher Austritt des Wasser-Erdstoff-Gemisches aus dem Entsandungsrohr zugrunde gelegt. In der Vortriebsgeschwindigkeit  $v_v$  sind die beim Vortrieb entstehenden Zwangspausen (Ansetzen eines neuen Filterrohres, Zurückziehen der Pressenstempel, erschwelter Vortrieb durch Hindernisse im Grundwasserleiter) nicht berücksichtigt.

### 2.5.3. Stützfilterausbildung

Unter Beachtung, daß eine möglichst große Förderleistung  $Q$ , eine möglichst große Sicherheit gegen Versandung  $\eta$  und keine nachteilige Einwirkung auf die Wassergüte des Horizontalfilterbrunnens erreicht wird, soll der Stützfilter

- einen gedrungenen Querschnitt und
- eine große natürliche Kornabstufung aufweisen.

Der Stützfilter soll in der Regel nicht über die abgesenkte Grundwasseroberfläche hinausragen.

Es muß mit hinreichend großer Sicherheit garantiert sein, daß sich der Scheitel des Stützfilters nicht bis zur Geländeoberfläche erstreckt.

Diesbezügliche Festlegungen sind von der geforderten Wassergüte abhängig, inwieweit auf kurzem Fließweg das Eindringen von oberflächennahem Grundwasser bzw. Oberflächenwasser vermieden werden muß.

Unmittelbar am Sammelschacht ist jeweils die maximal mögliche natürliche Kornabstufung zu erreichen. Wird darauf nicht geachtet, so besteht Gefahr, daß teilweise die Filterrohrechlitzelängs des Stranges sich mit Sandkörnern versetzen. Dies wird verursacht durch das am Dichtungstück (zwischen Filterrohr und Entsandungsrohr) in den Sammelschacht austretende Wasser infolge der dabei entstehenden Nachentsandung [28], S. 68.

#### 2.5.4. Strangabweichungen

Ursachen für Abweichungen von der geplanten Vortriebsrichtung sind:

- a) In dem Stützfilterquerschnitt ist in der Regel oberhalb der Vortriebsachse ein größerer aufgelockerter Bereich vorhanden als unterhalb [28], S. 125.
- b) Hindernisse (große Steine) sind im Grundwasserleiter vereinzelt vorhanden.
- c) Die Spitze des Vortriebskopfes liegt nicht in der Strangachse.
- d) Die Strangachse erfährt eine Krümmung durch nicht ordnungsgemäßes Ansetzen der Rohre bei der Strangverlängerung, z.B. beim Anschweißen der Filterrohre (Ranney-Verfahren).

Bei den unter b) bis d) angeführten Ursachen können Abweichungen nach allen Richtungen auftreten. Jedoch sind die unter c) und d) genannten Ursachen bei einer guten Bauausführung vermeidbar. Die unter a) angeführte Ursache dürfte der Hauptgrund für die Abweichungen sein. Diese treten wegen der Symmetrie des Stützfilters nur in der Vertikalebene des Stranges auf. Die Einmessung der Lage des Stranges und eine eventuelle Korrektur der Vortriebsrichtung ist nur in der Vertikalebene vorzunehmen.

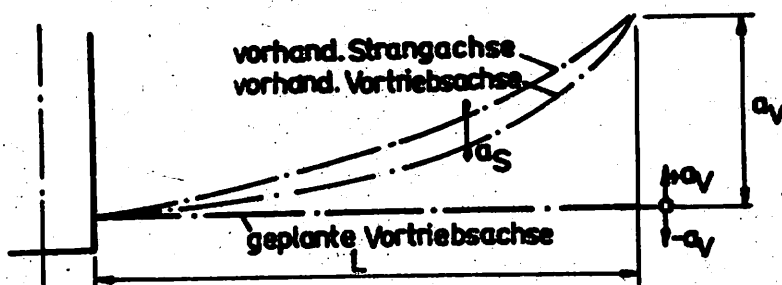


Bild 21  
Schema der  
Strangabweichungen

Bei einer Abweichung  $a_v$  von der "geplanten Vortriebsachse" nimmt diese mit wachsender Vortriebslänge rasch zu. Während des weiteren Vortriebes, bei dem sich die Abweichung  $a_v$  weiter vergrößert, entsteht infolge der Steifigkeit des Stranges eine Verminderung der Krümmung des am stärksten gekrümmten Strangteiles. Dabei verläßt der Horizontalfilterstrang seine ursprüngliche Lage ("vorhandene Vortriebsachse") und bewegt sich in die Lage "vorhandene Strangachse".

Es sind zwei verschiedene Verschiebungen zu unterscheiden

- a) Verschiebung  $a_v$

Das Maß der Gesamtstrangabweichung  $a_v$  hat Einfluß auf

- die Wassergüte des Stranges, was abhängig ist vom Aufbau und den Abmessungen des Stützfilters (siehe Abschnitt 2.5.3.), und
- die Förderleistung des Stranges.

Wird in Anlage 2/2

$$f = f \left( \frac{h_R + \frac{a_V}{2}}{h_H} \right) \quad (93)$$

gesetzt, so wird die Änderung von  $Q$  in der Regel vernachlässigbar klein sein. Bei dem Wert  $a_V$  ist das Vorzeichen zu beachten (siehe Bild 21).

b) Verschiebung  $a_S$

Der Abstand zwischen "vorhandener Vortriebsachse" und "vorhandener Strangachse"  $a_S$  hat Einfluß auf die Sicherheit gegen Versandung  $\eta$ . Zum Beispiel wird bei einer Abweichung des Stranges nach oben das Filterrohr im Bereich I (natürliche Kornabstufung) des Stützfilters angehoben, wodurch an der Filterrohrkante die wirksame Korngröße  $d_{WR}$  verkleinert wird.

Die bei einer bestimmten Verschiebung  $a_S$  noch vorhandene Sicherheit soll betragen

$$\eta_S = 0,5$$

Sie wird mit Hilfe der Anlagen 7 und 8 und der Gl.(22) des Standards errechnet, indem als Dicke des Bereiches I die Größe  $(m - a_S)$  in Ansatz gebracht wird.

Die Einmessung der Höhe der "vorhandenen Vortriebsachse" erfolgt während des Vortriebes und die Einmessung der Höhe der "vorhandenen Strangachse" wird nach Beendigung des Vortriebes vorgenommen. Dazu ist ein auf Millimetergenauigkeit arbeitendes Verfahren zu verwenden. Es wird das in [27], S. 153 beschriebene Verfahren empfohlen.

Ein vorzeitiges Abbrechen des Vortriebes wegen zu großer Strangabweichung kann vermieden werden, indem die Vortriebsrichtung während des Vortriebes vom Sammelschacht aus korrigiert wird [27], S. 157.

**Berechnungsbeispiele**

In den 3 Berechnungsbeispielen werden Brunnenanlagen mit 1 Horizontalfilterbrunnen behandelt.

Beispiel 1: ungespanntes Grundwasser, kreisförmige Anströmung

Beispiel 2: gespanntes Grundwasser, kreisförmige Anströmung

Beispiel 3: ungespanntes Grundwasser, H.Br. steht unmittelbar an einem See

Die Beispiele 1 und 2 enden mit der hydraulischen Bemessung und des Nachweises gegen Versandung. Der hydraulischen Bemessung liegt dabei folgende Annahme zugrunde: Ersatzradius der Horizontalfilterstränge  $r_E = 0,20$  m

Das Beispiel 3 ist vollständig durchgerechnet. Der Ersatzradius der Horizontalfilterstränge  $r_E$  und die Stützfilterquerschnitte werden im Gegensatz zu den Beispielen 1 und 2 ermittelt. Bedingt durch die äußeren Randbedingungen und damit dem in den einzelnen Anströmrichtungen unterschiedlich großen Grundwassergefälle zum H.Br. ergeben sich unterschiedlich große Stranglängen.

Zur Erläuterung des WAPRO ist in den Anlagen das Beispiel 1 als Ablesebeispiel eingetragen.

**Beispiel 1**

für Entnahmegbiet gilt:

-  $h_n = 13,0$  m ,  $k = 5 \cdot 10^{-4} \frac{\text{m}}{\text{s}}$  ,  $d_{50} = 0,66$  mm ,  $d_{100} = 13,0$  mm

- äußere Randbedingungen: kreisförmige Anströmung entsprechend

WAPRO 1.42. Bl. 2, Abschnitt 4.6., Typ A

$r_K = 600$  m, zentrische Lage des Brunnen

für Strangebene gilt:

-  $d_{10} = 0,24$  mm ,  $d_{50} = 0,68$  mm ,  $d_{60} = 1,2$  mm ,  $d_{94} = 9,0$  mm ,  $d_{100} = 15,0$  mm ,  $d_{wn} = 0,53$  mm ,

$n_n = 0,31$  ,  $n_{max} = 0,35$  ,

$k = 5 \cdot 10^{-4} \frac{\text{m}}{\text{s}}$  , Erdstoff ist suffosionssicher

-  $r_R = 108$  mm

Förderleistung:  $Q = 0,1 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$

**Algorithmus-Nr.**

**Abarbeitung des Algorithmus**

1 Bedingungen für H.Br. nach Anlage 1 erfüllt:

$Q = 0,1 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} = 360 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} > 350 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$

$d_{50} = 0,66$  mm  $>$  0,6 mm

$d_{100} = 13,0$  mm  $>$  8,0 mm

2 gewählt: 1 H.Br. mit  $Q = 0,1 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$

3 nach Gl.(7)  $h_E = \sqrt{h_n^2 - \frac{Q}{4\pi k} \cdot 2\psi_2}$

$\frac{Q}{4\pi k} = \frac{0,1}{4\pi \cdot 0,0005} = 15,9 \text{ m}^2$

nach WAPRO 1.42. Bl. 2, Gl.(24b)  $\psi_2 = 2 \ln \frac{r_K}{r}$

$2\psi_2 = 4 \ln \frac{r_K}{r_H} = 4 \ln \frac{600}{80} = 8,06$

$h_E = \sqrt{13,0^2 - 15,9 \cdot 8,06} = 6,39$  m

nach Gl.(7a)  $h_H = h_E = 6,35$  m

4  $h_S = 11,5$  m ,  $h_R = h_n - h_S = 13,0 - 11,5 = 1,50$  m

5  $L = 20,0$  m

- 6 nach Gl.(3)  $d_{94} \approx u < d_{100}$ , gewählt:  $u = 12$  mm  
nach Gl.(19)

$$d_{50 u} = \frac{\text{Siebdurchgang bei } d_x = u \text{ in } [\%]}{100 \%} d_{50} = \frac{98 \%}{100 \%} 0,68 = 0,667 \text{ mm}$$

nach Tabelle 3 des Standards

$$d_{50 u} = 0,667 \text{ mm} \rightarrow v_s = 6,94 \frac{\text{cm}}{\text{s}} ;$$

für  $k = 5 \cdot 10^{-4} \frac{\text{m}}{\text{s}}$ ,  $h_s = 11,5$  m gilt

L [m]	20
nach Anlage 3/3 $Q_{sp}^* \left[ \frac{1}{\text{s}} \right]$	4,7
nach Gl.(18) $v_R^* = 0,0576 \cdot Q_{sp}^* \left[ \frac{\text{cm}}{\text{s}} \right]$	270
$v_R^* / v_s$	39
nach Tabelle 2 des Standards $\beta$	0,98
nach Gl.(17) $Q_{sp} = \beta \cdot Q_{sp}^* \left[ \frac{1}{\text{s}} \right]$	4,6

Stranganzahl  $n \approx 10$  und  $\eta \approx 2$  ist noch nicht ermittelt.

- 9 nach Gl.(23)  $v_E = 0,0005 \cdot Q_{sp} = 0,0005 \cdot 4600 = 2,3 \frac{\text{cm}}{\text{s}}$

Nach Anlage 6 wird für  $u = 12$  mm,  $d_{60} = 1,2$  mm die Größe  $v_{kr} = 0,5 \frac{\text{cm}}{\text{s}}$  erhalten.

Stranganzahl  $n \approx 10$  und  $\eta \approx 2$  ist noch nicht ermittelt.

- 11  $r_E = 0,20$  m,  $s_0 \approx h_s - 1,0$  m,  $h_s = 11,5$  m

gewählt:  $s_0 = 9,35$  m

- 13  $h_H = 6,39$  m,  $h_R = 1,50$  m

$$s_{oH} = s_0 - (h_H - h_R) = 9,35 - (6,39 - 1,50) = 2,74 \text{ m}$$

$$\frac{h_R}{h_H} = \frac{1,50}{6,39} = 0,235 \text{ Anlage 2/2 } f = 0,94$$

$$k^{1/3} = 0,0005^{1/3} = 0,0794$$

$$s_{oH} = 2,70 \text{ m} < 0,5 \cdot h_H = 3,195 \rightarrow \text{Gl.(13)}$$

nach Gl.(13)

$$\tan \alpha = \frac{Q}{0,43 \cdot f \cdot k^{1/3} \cdot s_{oH}} = \frac{0,1}{0,43 \cdot 0,94 \cdot 0,0794 \cdot 2,74} = 1,14$$

nach Anlage 2/1 wird für

$$\tan \alpha = 1,14, h_H = 6,39 \text{ m}, L = 20 \text{ m}, r_E = 0,20 \text{ m}$$

erhalten die Stranganzahl  $n = 8$

- 16 Es ergibt sich  $\frac{v_E}{v_{kr}} = \frac{2,3}{0,5} = 4,6$ ,  $U = \frac{d_{60}}{d_{10}} = \frac{1,2}{0,24} = 5$

Nach Anlage 8 wird für  $d_{50} = 0,68$  mm,  $U = 5$ ,

$$\frac{v_E}{v_{kr}} = 4,6 \text{ bei } L = 20 \text{ m}, \eta = 2,0 \text{ erhalten.}$$

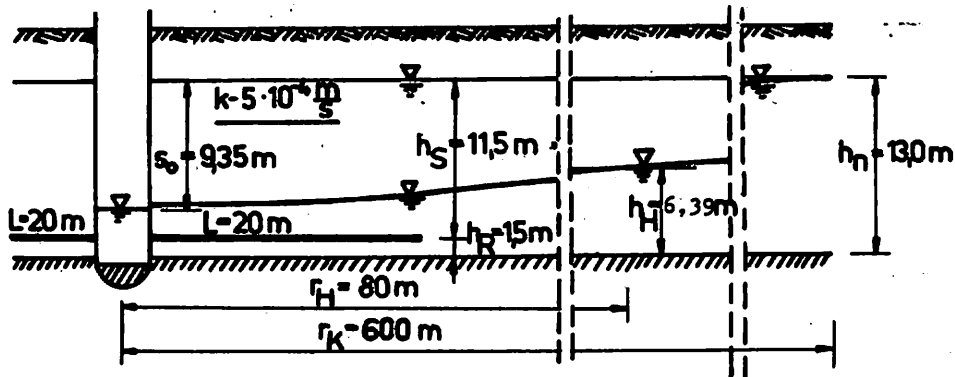
$v_v \left[ \frac{\text{m}}{\text{h}} \right]$	0,3	0,1
$w_s \left[ \text{mm} \right]$	2,0	2,5

$\eta \approx 2,0$ ,  $n \approx 10$  erfüllt, somit ergibt sich als

Zwischenergebnis: Der H.Br. ist technisch mit großer Wahrscheinlichkeit als Variante möglich, da Abschnitt 2.5.3. des Standards in der Regel erfüllt ist.



Eine weitere Abarbeitung des Algorithmus erfolgt bei diesem Beispiel nicht.



Absenkung für  $Q = 0,100 \text{ m}^3/\text{s}$

gewählt : 8 Stränge zu  $L = 20\text{ m}$

Schlitzweite im Filterrohr  $w_s = 25\text{ mm}$

Schlitzweite im Vortriebskopf  $u = 12\text{ mm}$

Anordnung der Grundwasserbeobachtungsrohre nach Abschn. 12.

Bild 1

Ermittlung der Förderleistung  $Q$  in Abhängigkeit von der Absenkung  $s_0$ .

Die Berechnung erfolgt in Tabelle 1 der Beispiele. Es werden dazu folgende Gleichungen und Grafiken verwendet:

$$\text{nach Gl. (7)} \quad h_B = \sqrt{h_n^2 - \frac{Q}{4r_K} 2 \gamma_2} = \sqrt{169,0 - \frac{Q \cdot 8,06}{4r \cdot 0,0005}}$$

$$h_B = \sqrt{169,0 - 1282,8 \cdot Q}$$

$$\text{nach Gl. (7a)} \quad h_H = h_B$$

Der Beiwert  $\tan \alpha$  ist für  $r_B = 0,20\text{ m}$ ,  $n = 8$ ,  $L = 20\text{ m}$  und für die ermittelten Werte der Größe  $h_H$  aus Anlage 2/1 abzulesen.

Für  $s_{oH} \leq 0,5 h_H$  gilt nach Gl. (13):

$$s_{oH} = \frac{1}{0,43 \cdot k^{1/3}} \cdot \frac{Q}{\tan \alpha \cdot r} = \frac{1}{0,43 \cdot 0,0794} \cdot \frac{Q}{\tan \alpha \cdot r}$$

$$s_{oH} = 29,3 \frac{Q}{\tan \alpha \cdot r}$$

Zum Vergleich wird Gl. (14), die für  $s_{oH} > 0,5 h_H$  gilt, mit in Tabelle 1 der Beispiele ausgewertet. Sie lautet nach der Umstellung

$$s_{oH} = \left( 29,3 \frac{Q}{\tan \alpha \cdot r} \right)^{1,2}$$

Die Gesamtabenkung wird erhalten zu

$$s_0 = s_{oH} + (h_n - h_H) \quad [\text{m}]$$

Tabelle 1

Q [m <sup>3</sup> /s]		0,025	0,050	0,075	0,100	0,105
nach	1282,8 · Q	32,07	64,14	96,21	128,28	134,69
Gl.(7)	$h_R$ [m]	11,70	10,24	8,53	6,39	5,86
$h_H = h_R$	[m]	11,70	10,24	8,53	6,39	5,86
tan α		1,50	1,45	1,32	1,14	1,10
$h_R/h_H$		0,13	0,15	0,18	0,24	0,26
f nach Anlage 2/2		0,73	0,76	0,82	0,94	0,96
Q/tan α · f		0,0228	0,0454	0,0693	0,0935	0,0994
$s_{oH}$ [m] nach Gl.(13)		0,67	1,33	2,03	2,74	2,91
$h_n - h_H$ [m]		1,30	2,76	4,47	6,61	7,14
$s_o$ [m] mit $s_{oH}$ nach Gl.(13)		1,97	4,09	6,50	9,35	10,05
$s_{oH}$ [m] nach Gl.(14)		0,62	1,41	2,34	3,35	3,60
$s_o$ [m] mit $s_{oH}$ nach Gl.(14)		1,92	4,17	6,81	9,96	10,74

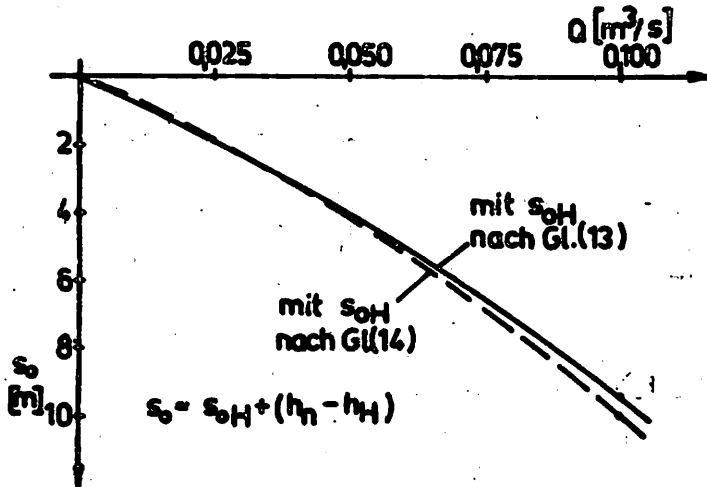


Bild 2

Beispiel 2

für Entnahmegbiet gilt:

- $h_n = 20,0$  m,  $M = 8,0$  m,  $k = 10^{-3} \frac{m}{s}$
- $d_{50} = 0,75$  mm,  $d_{100} = 20,0$  mm

- äußere Randbedingungen: kreisförmige Anströmung entsprechend WAFRO 1.42. Bl. 2, Abschnitt 4.6., Typ A
- $r_R = 800$  m, zentrische Lage des Brunnens

für Strangebene gilt:

- $d_{10} = 0,32$  mm,  $d_{50} = 0,72$  mm,  $d_{60} = 1,0$  mm,  $d_{94} = 12,0$  mm
- $d_{100} = 30,0$  mm,  $d_{wz} = 0,62$  mm,  $n_2 = 0,33$ ,  $n_{max} = 0,37$

$k = 10^{-3} \frac{\text{m}}{\text{s}}$ , Erdstoff ist suffosionssicher

-  $r_R = 108 \text{ mm}$

Förderleistung:  $Q = 0,25 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$

Algorithmus Nr.

Abarbeitung des Algorithmus

1 Bedingung für H.Br. nach Anlage 1 erfüllt:

$$Q = 0,25 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} = 900 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} > 350 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

$$d_{50} = 0,73 \text{ mm} > 0,6 \text{ mm}, d_{100} = 30,0 \text{ mm} > 8,0 \text{ mm}$$

2 gewählt: 1 H.Br. mit  $Q = 0,25 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$

3 nach WAERO 1.42. Bl. 2, Gl.(24b)

$$f_2 = 2 \ln \frac{r_K}{r_H} = 2 \ln \frac{800}{80} = 4,605$$

$$\text{nach Gl.(8)} \quad Q^* = 4\sqrt{k} M(h_n - M) \frac{1}{f_2}$$

$$Q^* = 4\sqrt{10^{-3} \cdot 8,0(20,0-8,0)} \frac{1}{4,605} = 0,262 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

für  $Q = 0,25 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$  ergibt sich  $Q < Q^*$ ; nach Gl.(10) gilt

$$h_E = h_n - \frac{Q}{4\sqrt{k}} \frac{f_2}{M} : \frac{Q}{4\sqrt{k}} \frac{0,25}{4\sqrt{10^{-3}}} = 19,9$$

$$h_E = 20,0 - 19,9 \frac{4,605}{8,00} = 8,54 \text{ m}$$

$$\text{nach Gl.(10a)} \quad h_H = \sqrt{M(2h_E - M)} = \sqrt{8,0(2 \cdot 8,54 - 8,0)} = 8,52 \text{ m}$$

$$\text{nach Gl.(11)} \quad r^* = r_H \exp\left(-\frac{2\sqrt{k}M(h_E - M)}{Q}\right)$$

$$r^* = 80,0 \exp\left(-\frac{2\sqrt{10^{-3}} \cdot 8,0(8,54-8,0)}{0,25}\right) = 80 \exp(-0,1086) = 72 \text{ m}$$

$$\text{nach Gl.(12)} \quad N = \min(r_H, 4L)$$

Nach Nr. 5 des Algorithmus wird  $L = 40,0 \text{ m}$  gewählt.

$$N = \min(80,0; 4 \cdot 40) = 80,0 \text{ m}$$

$\frac{r^*}{N} = \frac{72}{80} = 0,90 < 1$ , so sind die Ergebnisse nach Gl.(13) bzw. Gl.(14) nur als Näherungslösung zu werten (Nr. 13 des Algorithmus)

4  $h_B = 18,50 \text{ m}$ ,  $h_R = h_n - h_B = 20,00 - 18,50 = 1,50 \text{ m}$

5  $L = 40,0 \text{ m}$

6 nach Gl.(3)  $d_{94} \leq u < d_{100}$ , gewählt:  $u = 20 \text{ mm}$

nach Gl.(19)

$$d_{50} u = \frac{\text{Siebdurchgang bei } d_x = u \text{ in } [\%]}{100 \%} d_{50} = \frac{97}{100} 0,72 = 0,70 \text{ mm}$$

$$\text{nach Tabelle 3 des Standards } d_{50} u = 0,70 \text{ mm} \rightarrow v_B = 7,31 \frac{\text{cm}}{\text{s}}$$

für  $k = 10^{-3} \frac{m}{s}$ ,  $h_s = 18,50$  m gilt

L [m]		40
nach Anlage 3/2	$Q_{sp}^* \left[ \frac{l}{s} \right]$	5,4
nach Gl.(18)	$v_R^* \left[ \frac{cm}{s} \right]$	311
	$v_R^* / v_B$	42,5
nach Tabelle 2 des Standards $\beta$		0,99
nach Gl.(17)	$Q_{sp} = \beta \cdot Q_{sp}^* \left[ \frac{l}{s} \right]$	5,35

Stranganzahl  $n \leq 10$  und  $\eta \leq 2$  ist noch nicht ermittelt.

9 nach Gl.(23)  $v_E = 0,0005 Q_{sp} = 0,0005 \cdot 5346 = 2,67 \frac{cm}{s}$

Nach Anlage 6 wird für  $u = 20$  mm,  $d_{60} = 1,0$  mm die Größe  $v_{kr} = 0,27 \frac{cm}{s}$  erhalten.

Stranganzahl  $n \leq 10$  und  $\eta = 2$  ist noch nicht ermittelt.

11  $r_E = 0,20$  m,  $s_o \leq h_s - 1,0$  m,  $h_s = 18,50$  m

gewählt:  $s_o = 15,2$  m

13  $h_H = 8,52$  m,  $h_R = 1,50$  m

$s_{oH} = s_o - (h_n - h_H) = 15,20 - (20,00 - 8,52) = 3,72$  m

$\frac{h_R}{h_H} = \frac{1,50}{8,52} = 0,176$  Anlage 2/2  $f = 0,82$

$k^{1/3} = 0,001^{1/3} = 0,10$

$s_{oH} = 3,72 < 0,5 \cdot h_H = 4,26 \rightarrow$  Gl.(13)

nach Gl.(13)

$\tan \alpha = \frac{Q}{0,43 \cdot f \cdot k^{1/3} \cdot s_{oH}} = \frac{0,25}{0,43 \cdot 0,82 \cdot 0,1 \cdot 3,72} = 1,91$

nach Anlage 2/1 wird für

$\tan \alpha = 1,91$ ,  $h_H = 8,52$  m,  $L = 40$  m,  $r_E = 0,20$  m

erhalten die Stranganzahl  $n = 10$

16 Es ergibt sich  $\frac{v_E}{v_{kr}} = \frac{2,67}{0,27} = 9,9$ ,  $U = \frac{d_{60}}{d_{10}} = \frac{1,0}{0,32} = 3,13$

Nach Anlage 8 wird für  $d_{50} = 0,72$  mm,  $U = 3$ ,  $\frac{v_E}{v_{kr}} = 9,9$  bei  $L = 40$  m,

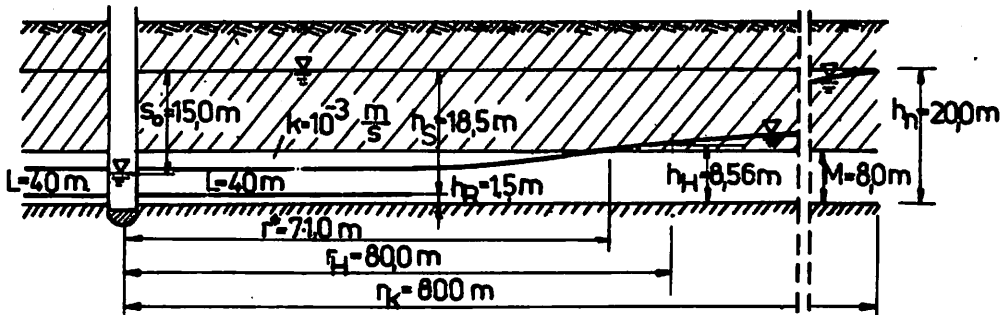
$\eta = 2,0$  erhalten

$v_v \left[ \frac{m}{h} \right]$	0,1	0,3	0,8
$w_B \left[ mm \right]$	5	4	3

$\eta \leq 2,0$ ,  $n \leq 10$  erfüllt, somit ergibt sich als Zwischenergebnis:

Der H.Br. ist technisch mit großer Wahrscheinlichkeit als Variante möglich, da Abschnitt 2.5.3. des Standards in der Regel erfüllt ist.

Eine weitere Abarbeitung des Algorithmus erfolgt bei diesem Beispiel nicht.



Abenkung für  $Q=0,25 \text{ m}^3/\text{s}$   
 gewählt: 10 Stränge zu  $L=40 \text{ m}$   
 Schlitzweite im Filterrohr  $w_s=5 \text{ mm}$   
 Schlitzweite im Vortriebskopf  $u=20 \text{ mm}$   
 Anordnung der Grundwasserbeobachtungsrohre nach Abschn. 1.2.

Bild 3

Ermittlung der Förderleistung  $Q$  in Abhängigkeit von der Absenkung  $s_0$

Die Berechnung erfolgt in Tabelle 2 der Beispiele. Es werden dazu folgende Gleichungen und Grafiken verwendet:

für  $Q < Q^* = 0,262 \text{ m}^3/\text{s}$  gilt nach Gl.(10)

$$h_E = h_n - \frac{Q}{4\pi k M} \frac{\gamma_2}{M} ; \frac{\gamma_2}{4\pi k M} = \frac{4,60}{4\pi \cdot 10^{-3} \cdot 8,0} = 45,8$$

$$h_E = 20,0 - 45,8 \cdot Q$$

für  $Q \geq Q^* = 0,262 \text{ m}^3/\text{s}$  gilt nach Gl.(9)

$$h_E = \sqrt{2 M (h_n - \frac{Q}{4\pi k} \frac{\gamma_2}{M} - \frac{M}{2})}$$

$$h_E = \sqrt{16,0 (20,0 - 45,8 \cdot Q - 4,0)}$$

nach Gl.(10a)

$$h_H = \sqrt{M(2h_E - M)} = \sqrt{8,0(2h_E - 8,0)}$$

nach Gl.(9a)  $h_H = h_E$

Der Beiwert  $\tan \alpha$  ist für  $r_E = 0,20 \text{ m}$ ,  $n = 10$ ,  $L = 40 \text{ m}$  und für die ermittelten Werte der Größe  $h_H$  aus Anlage 2/1 abzulesen.

für  $s_{oH} \leq 0,5 h_H$  gilt nach Gl.(13)

$$s_{oH} = \frac{1}{0,43 \cdot k^{1/3}} \frac{Q}{\tan \alpha \cdot l} = \frac{1}{0,43 \cdot 0,10} \frac{Q}{\tan \alpha \cdot l}$$

$$s_{oH} = 23,25 \frac{Q}{\tan \alpha \cdot l}$$

Der Beiwert  $f$  wird in Abhängigkeit von  $h_R/h_H$  aus Anlage 2/2 abgelesen.

Tabelle 2

$Q \text{ m}^3/\text{s}$		0,20	0,25	0,262	0,30
nach	$45,8 \cdot Q$	9,16	11,45	12,00	13,74
Gl. (10)	$h_B = 20,0 - 45,8 \cdot Q \text{ [m]}$	10,84	8,55	8,00	6,26
nach	$16(20,0 - 45,7 \cdot Q - 4,0)$			64,00	36,20
Gl. (9)	$h_B \text{ [m]}$			8,00	6,07
nach	$8,0(2h_B - 8,0)$	109,4	72,8		
Gl. (10a)	$h_H \text{ [m]}$	10,46	8,53		
$h_H = h_B$ nach Gl. (9a)				8,00	6,02
$\tan \alpha$ nach Anlage 2/1		2,10	1,90	1,85	1,65
$h_R/h_H$		0,143	0,176	0,188	0,249
$f$ nach Anlage 2/2		0,75	0,82	0,85	0,94
$Q/\tan \alpha \cdot f$		0,1270	0,1607	0,1666	0,1935
$s_{oH} \text{ [m]}$ nach Gl. (13)		2,96	3,74	3,88	4,50
$h_n - h_H \text{ [m]}$		9,54	11,47	12,00	13,98
$s_o = s_{oH} + (h_n - h_H) \text{ [m]}$		12,50	15,21	15,88	18,48

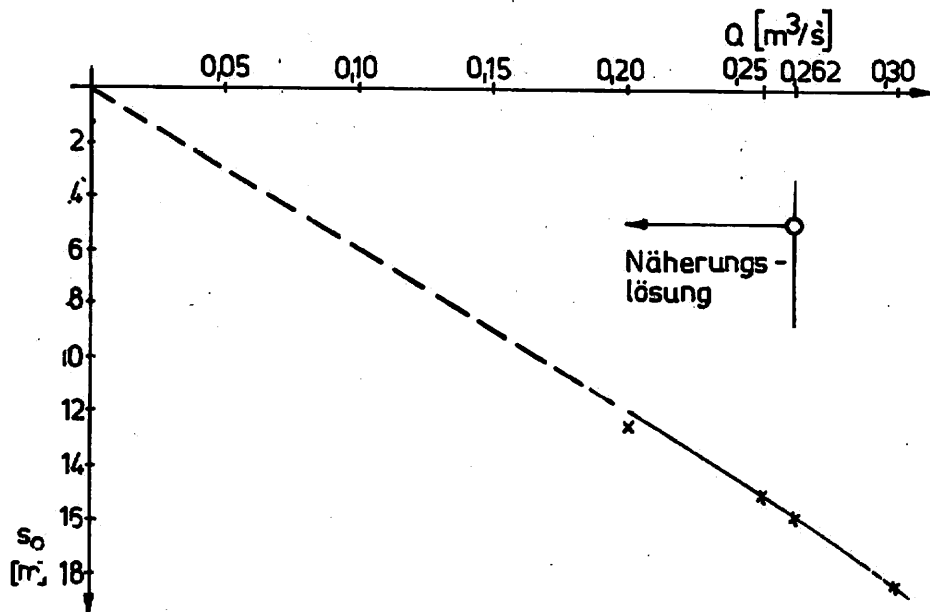


Bild 4

Beispiel 3

Für Entnahmegebiet gilt:

Als Geometrie des räumlichen Grundwasserströmungsfeldes sind die Verhältnisse von Aufgabe 2 aus WAFRO 1.42. Bl. 4 zugrunde gelegt. Es wird auf "Zu Abschnitt 1.1.4." bis "Zu Abschnitt 1.1.10." und dem Isohypsenplan der Aufgabe 2 von WAFRO 1.42. Bl. 4 aufgebaut.

-  $h_n$  ist veränderlich (siehe Bild 12 in WAFRO 1.42. Bl. 4 und Bild 6 der Beispiele)

-  $k = 5 \cdot 10^{-4} \frac{m}{s}$ ,  $d_{50} = 0,66 \text{ mm}$ ,  $d_{100} = 13,0 \text{ mm}$

- äußere Randbedingungen:

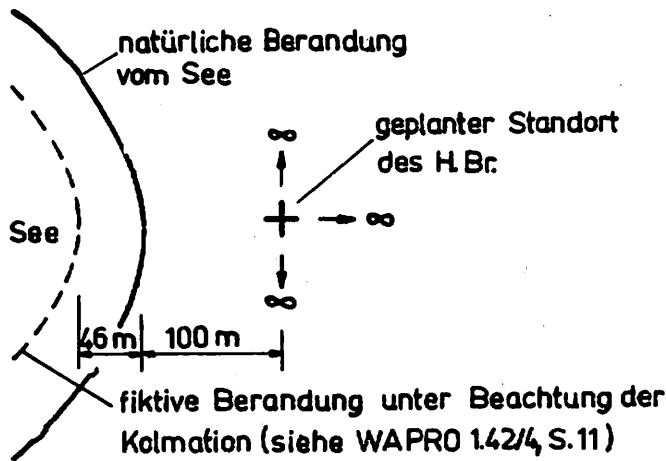


Bild 5

Die äußeren Randbedingungen entsprechen WAFRO 1.42. Bl. 2, Abschnitt 4.7., Typ B, parabolische Berandung.

Für Strangebene gilt:

-  $d_{10} = 0,24 \text{ mm}$ ,  $d_{50} = 0,68 \text{ mm}$ ,  $d_{60} = 1,2 \text{ mm}$ ,  $d_{94} = 9,0 \text{ mm}$

$d_{100} = 15,0 \text{ mm}$ ,  $d_{wn} = 0,53 \text{ mm}$ ,  $n_n = 0,31$ ,  $n_{max} = 0,35$

$k = 5 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$ , Erdstoff ist suffosionssicher

-  $r_R = 108 \text{ mm}$

Förderleistung:  $Q = 0,255 \frac{m^3}{s}$

Algorithmus-Nr.

Abarbeitung des Algorithmus

1 Bedingungen für H.Br. nach Anlage 1 erfüllt

$Q = 0,255 \frac{m^3}{s} = 920 \frac{m^3}{h} > 350 \frac{m^3}{h}$

$d_{50} = 0,68 \text{ mm} > 0,6 \text{ mm}$ ,  $d_{100} = 15,0 \text{ mm} > 8,0 \text{ mm}$

2 gewählt: 1 H.Br. mit  $Q = 0,255 \frac{m^3}{s}$

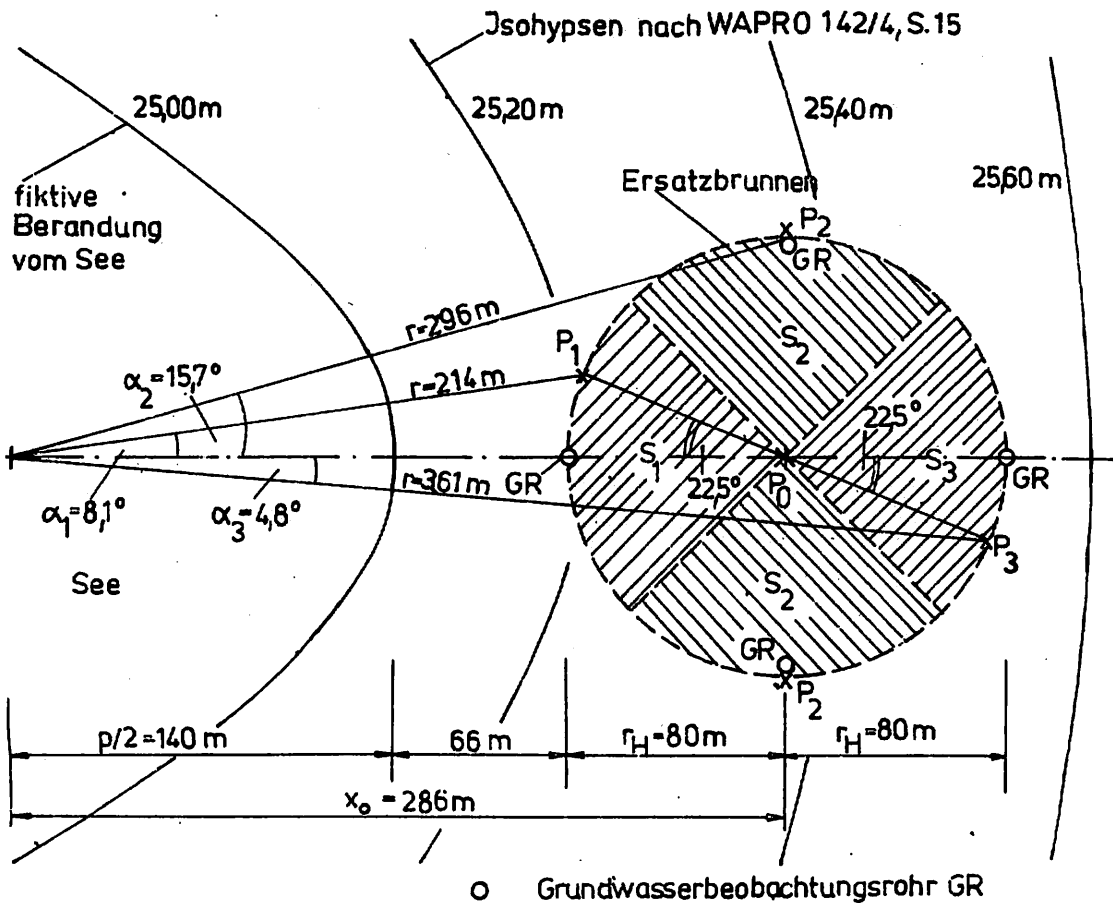


Bild 6

Infolge der äußeren Randbedingungen ist das Gefälle der Grundwasseroberfläche beim Zufluß zu dem Ersatzbrunnen von unterschiedlicher Größe. So ist das Gefälle auf der Seeseite wesentlich größer als auf der dem See gegenüber liegenden Seite. Das gleiche trifft für den Zufluß zum Horizontalfilterbrunnen zu. Dies wird in der Berechnung wie folgt berücksichtigt:

- Der Ersatzbrunnen wird in 4 Sektoren unterteilt.

Die Sektoren werden im folgenden wie drei verschiedene Ersatzbrunnen bzw. wie drei verschiedene Horizontalfilterbrunnen mit gleicher Höhenlage der Strangebene behandelt.

- Es wird die Annahme getroffen, daß der Punkt P<sub>1</sub> für den Sektor S<sub>1</sub>, P<sub>2</sub> für S<sub>2</sub> und P<sub>3</sub> für S<sub>3</sub> repräsentativ ist.

Die Größen r, α und h<sub>n</sub> für die Punkte P<sub>0</sub> bis P<sub>3</sub> sind in Tabelle 3 der Beispiele eingetragen. Die Größen h<sub>n</sub> sind aus Bild 12 der Aufgabe 2 von WAPRO 1.42. Bl. 4 entnommen.

$$3 \text{ nach Gl. (7)} \quad h_E = \sqrt{h_n^2 - \frac{Q}{4\pi F} 2 \varphi_2}$$

$$Q = 2\pi k (h_n^2 - h_E^2) \frac{1}{\gamma_2}$$

$$\text{nach Gl. (7a)} \quad h_H = h_E$$

nach WAPRO 1.42. Bl. 2, Gl. (29b)

$$\varphi_2(r_H) = 2 \ln \frac{4 x_0 - 2 \sqrt{2p \cdot x_0}}{r_H}$$



nach WAFRO 1.42. Bl. 2, Gl.(29a)

$$\varphi_2 = \ln \frac{(\sqrt{2p} - \sqrt{x_0})^2 - 2(\sqrt{2p} - \sqrt{x_0})\sqrt{r} \cos(\frac{\alpha}{2}) + r}{x_0 - 2\sqrt{x_0}\sqrt{r} \cos(\frac{\alpha}{2}) + r}$$

Die Berechnung wird wie folgt vorgenommen:

1. Ermittlung von  $h_E$  für  $P_0$  nach Gl.(7), wobei  $Q = 0,255 \frac{m^3}{s}$  und  $\varphi_2(r_H)$  nach WAFRO 1.42. Bl. 2, Gl.(29b) eingesetzt wird.  
Die für  $P_0$  bestimmte Größe  $h_E$  wird auch für die Punkte  $P_1$  bis  $P_3$  zugrunde gelegt.
2. Für die Punkte  $P_1, P_2, P_3$  Bestimmung von  $Q$  nach Gl.(7) mit der ermittelten Größe  $h_E$  und  $\varphi_2$  nach WAFRO 1.42. Bl. 2, Gl.(29a).

nach WAFRO 1.42. Bl. 2, Gl.(29b) gilt für  $P_0$  mit  $x_0 = 286$  m  
 $p = 280$  m und  $r_H = 80$  m

$$\varphi_2(r_H) = 2 \ln \frac{4 \cdot 286 - 2\sqrt{2 \cdot 280 \cdot 286}}{80} = 2,92$$

nach Gl.(7)

$$h_E(P_0 \text{ bis } P_3) = \sqrt{25,35^2 - \frac{0,255}{4\pi \cdot 0,0005} 2 \cdot 2,92} = 20,13 \text{ m}$$

nach WAFRO 1.42. Bl. 2, Gl.(29a) ergibt sich mit  $x_0 = 286$  m und  $p = 280$  m

$$\begin{aligned} \varphi_2(P_1 \text{ bis } P_3) &= \ln \frac{45,6 - 13,5\sqrt{r} \cos(\alpha/2) + r}{286 - 33,8\sqrt{r} \cos(\alpha/2) + r} \\ \varphi_2(P_1) &= \ln \frac{45,6 - 13,5\sqrt{214,5} \cdot 0,997 + 214,5}{286 - 33,8\sqrt{214,5} \cdot 0,997 + 214,5} = 2,20 \\ \varphi_2(P_2) &= \ln \frac{45,6 - 13,5\sqrt{296,0} \cdot 0,991 + 296,0}{286 - 33,8\sqrt{296,0} \cdot 0,991 + 296,0} = 2,94 \\ \varphi_2(P_3) &= \ln \frac{45,6 - 13,5\sqrt{361,0} \cdot 0,999 + 361,0}{286 - 33,8\sqrt{361,0} \cdot 0,999 + 361,0} = 3,32 \end{aligned}$$

nach Gl.(7)

$$Q(P_1) = 2\pi \cdot 0,0005(25,20^2 - 20,13^2) \frac{1}{2,20} = 0,328 \frac{m^3}{s}$$

$$Q(P_2) = 2\pi \cdot 0,0005(25,35^2 - 20,13^2) \frac{1}{2,94} = 0,254 \frac{m^3}{s}$$

$$Q(P_3) = 2\pi \cdot 0,0005(25,55^2 - 20,13^2) \frac{1}{3,32} = 0,234 \frac{m^3}{s}$$

4  $h_S = h_n - h_R$ ,  $h_R = 13,0$  m,

$h_S$  für  $P_0$  bis  $P_3$  siehe Tabelle 3 der Beispiele

5 Die Stranglänge  $L$  wird wie folgt gewählt:

$P_i$	$P_0$	$P_1$	$P_2$	$P_3$
$L$ [m]	25,0	35,0	30,0	18,0

6 nach Gl.(3)  $d_{94} \leq u < d_{100}$ , gewählt:  $u = 12$  mm

nach Gl.(19)

$$d_{50} u = \frac{\text{Siebdurchgang bei } d_x = u \text{ in } [\%]}{100 \%} \cdot d_{50} = \frac{98 \%}{100 \%} 0,68 = 0,667 \text{ mm}$$

nach Tabelle 3 des Standards  $d_{50} u = 0,667 \rightarrow v_S = 6,94 \frac{cm}{s}$

Über die Ermittlung von  $Q_{Sp}^*$  nach Anlage 3/3,  $v_R^*$  nach Gl.(18),  $v_R^*/v_S$ ,  $\beta$  nach Tabelle 2 des Standards und  $Q_{Sp}$  nach Gl.(17), siehe Tabelle 3 der Beispiele.

- 9 nach Gl.(23) ergibt sich  $v_E = 0,0005 \cdot Q_{Sp}$ , siehe Tabelle 3 der Beispiele  
nach Anlage 6 wird für  $u = 12 \text{ mm}$ ,  $d_{60} = 1,2 \text{ mm}$  die Größe  $v_{kr} = 0,5 \frac{\text{cm}}{\text{s}}$  erhalten
- 11  $r_E = 0,20 \text{ m}$ ,  $s_o \leq h_S - 1,0$ , gewählt:  $s_o = 9,00 \text{ m}$
- 13  $h_H = 20,13 \text{ m}$ ,  $h_R = 13,00 \text{ m}$ ,  $s_{oH} = s_o - (h_n - h_H)$ , siehe Tabelle 3 der Beispiele

$$\frac{h_R}{h_H} = \frac{13,00}{20,13} = 0,646 \xrightarrow{\text{Anlage 2/2}} f = 0,94$$

$$k^{1/3} = 0,0005^{1/3} = 0,0794$$

$$s_{oH}(P_1) = 3,93 \text{ m} < 0,5 \cdot h_H = 10,07 \text{ m} \rightarrow \text{Gl. (13)}$$

nach Gl.(13)

$$\tan \alpha = \frac{Q}{0,43 \cdot f \cdot k^{1/3} \cdot s_{oH}} = \frac{1}{0,43 \cdot 0,94 \cdot 0,0794} \frac{Q}{s_{oH}} = 31,2 \frac{Q}{s_{oH}}$$

$\tan \alpha$  für  $P_o$  bis  $P_3$  siehe Tabelle 3 der Beispiele

Nach Anlage 2/1 wird für die ermittelten Werte  $\tan \alpha$ ,  $h_H$ ,  $L$  und  $r_E = 0,20 \text{ m}$  die Stranganzahl  $n$  erhalten, siehe Tabelle 3 der Beispiele.

- 16 Bestimmung der Werte  $v_E/v_{kr}$  siehe Tabelle 3 der Beispiele

Nach Anlage 8 wird für  $d_{50} = 0,68 \text{ mm}$ ,  $U = d_{60}/d_{10} = 1,2/0,24 = 5$ ,  $v_E/v_{kr}$  in Abhängigkeit von  $L$ ,  $\eta = 2,0$  die Schlitzweite  $w_s$  in Abhängigkeit von der Vortriebsgeschwindigkeit  $v_v$  ermittelt, siehe Tabelle 3 der Beispiele. Bei Variante 1 haben die Stränge unterschiedlich große Schlitzweiten. Es wird Variante 2 mit der einheitlichen Schlitzweite  $w_s = 2,0 \text{ mm}$  gewählt und bei der weiteren Berechnung zugrunde gelegt.

Es ist  $\eta \leq 2$  und  $n \leq 10$  erfüllt, somit ergibt sich als Zwischenergebnis: Der H.Br. ist technisch mit großer Wahrscheinlichkeit als Variante möglich, da Abschnitt 2.5.3. des Standards in der Regel erfüllt ist.

- 7 Nach Anlage 4 werden die Größen  $h_{St}^*$  1 und  $b_{St}^*/2$  in Abhängigkeit von  $Q_{Sp}/k$  ermittelt.

$$k = 5 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$$

Nach Gl.(20) wird  $b_{St} = 2 \cdot 0,7 \cdot b_{St}^*/2$  erhalten.

In Tabelle 3 der Beispiele ergibt sich  $Q_{Sp}/k = 7,8$  bis  $12,0 \text{ m}^2$ .

Nach Tabelle 1 des Standards ist für  $Q_{Sp}/k = 6,0$  bis  $20,0 \text{ m}^2$   $m_{Sp} \approx 0,30 \text{ t/m}$  zu wählen.

Es wird  $m_{Sp} = 0,30 \text{ t/m}$  gewählt.

Für die Ermittlung von  $h_{St}^*$  nach Gl.(21) wird die Größe  $(n_{II} - n_n)$  nach Anlage 5 gefunden, indem

- zunächst für den Ausdruck  $(n_{II} - n_n)/(n_{max} - n_n)$  ein Wert gewählt wird,
- aus diesem die Größe  $(n_{II} - n_n)$  ermittelt wird und
- nach Gl.(21) mit der Größe  $(n_{II} - n_n)$  die Größe  $h_{St}^*$  errechnet wird.

Dies ist zu wiederholen bis in Anlage 5 für die vorhandene Größe  $Q_{Sp}/k$  und den gewählten Ausdruck  $(n_{II} - n_n)/(n_{max} - n_n)$  die Größe  $h_{St}^*$  mit der nach Gl.(21) ermittelten Größe  $h_{St}^*$  übereinstimmt.

- 8 Es gilt:  $h_{St} 2 \approx h_{St}^*$ . Die größte Stützfilterhöhe ist bei dem längsten Strang vorhanden. Somit wird für die 2 Stränge des Sektors 1 am Strangkopf erhalten (siehe Tabelle 3 der Beispiele):

$$h_{St} 2 \approx h_{St}^* = 3,32 \text{ m}$$

Höhenlage der Grundwasseroberfläche im natürlichen Zustand über der Strangachse im Sektor 1:  $h_S = 12,20 \text{ m}$

Höhenlage des Wasserspiegels im Sammelschacht (ausgehend von  $h_n$  in  $P_0$ ) über der Strangachse bei maximaler Absenkung: 3,35 m

Damit sind die Anforderungen an den Stützfilter nach Abschnitt 2.5.3. des Standards erfüllt.

- 9 Die Größen  $v_B$  und  $v_{kr}$  sind bereits ermittelt, siehe Tabelle 3 der Beispiele  
 10 Nach Gl.(22)  $d_{wR} = C_1 \cdot C_2 \cdot d_{wn}$ ,  $d_{wn} = 0,53$  mm

Die Größe  $v_B/v_{kr}$  für die Ermittlung von  $C_1$  nach Tabelle 4 ist im Algorithmus Nr. 16 errechnet. Die zur Bestimmung von  $C_2$  nach Tabelle 5 erforderlichen Werte der Vortriebsgeschwindigkeit  $v_v$  sind ebenfalls im Algorithmus Nr. 16 ermittelt worden. Maßgebend ist die Variante 2 mit  $w_B = 2,0$  mm.

Aus Anlage 7 werden für  $d_{wR}/d_{wn} = 3,40$  die Größen  $m = 69$  mm und  $d_{wI}/d_{wn} = 1,50$  abgelesen.

- 12 nach Gl.(24)  $r_{IE} = (r_R + m)^{(1-c)} \cdot r_R^c$ ;  $r_R = 108$  mm

nach Gl.(25) 
$$c = \frac{1}{\left(\frac{d_{wI}}{d_{wn}}\right)^2} = \frac{1}{1,50^2} = 0,444$$

$$r_{IE} = (108 + 69)^{(1-0,444)} \cdot 108^{0,444} = 17,8 \cdot 8,01 = 143$$
 mm

nach Gl.(26) 
$$r_E = \left(\frac{b_{St}}{2}\right)^{\left(1 - \frac{k_n}{k_{II}}\right)} \cdot r_{IE}^{\left(\frac{k_n}{k_{II}}\right)}$$

nach Gl.(27)

$$\frac{k_n}{k_{II}} = \left[\frac{n_n(1-n_{II})}{n_{II}(1-n_n)}\right]^2 = \left[\frac{n_n}{1-n_n} \cdot \frac{1-n_{II}}{n_{II}}\right]^2$$

$$\frac{n_n}{1-n_n} = \frac{0,31}{1-0,31} = 0,45$$

Es wird in Tabelle 3 der Beispiele  $r_E = 197$  bis 200 mm erhalten.

- 14 Die hydraulische Bemessung nach Abschnitt 2.1.2. des Standards unter Berücksichtigung von  $r_E = f(L/2)$  kann entfallen.

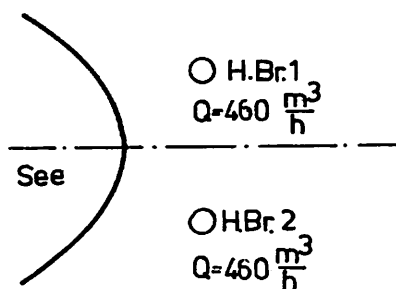
Die vorhandene geringe Differenz von  $r_E = 197$  bis 200 mm zu  $r_E = 200$  mm, mit der die Bemessung vorgenommen wurde, ist bei der Bemessung nicht erfaßbar. Die Bemessung ist damit abgeschlossen.

Bei der Bemessung wurde jeweils eine Stranganzahl  $n = 8$  gewählt (Algorithmus Nr. 13). Somit werden bei Vorhandensein von 4 Sektoren (siehe Bild 6 der Beispiele) in jedem Sektor 2 Stränge angeordnet.

Die im Algorithmus Nr. 2;3 der Tabelle 3 der Beispiele ermittelte Förderleistung  $Q$  ist durch 4 zu teilen, da 4 gleich große Sektoren gewählt wurden. Die Gesamtförderleistung des Horizontalfilterbrunnens beträgt für die Absenkung  $s_0 = 9,00$  m

$$Q = \frac{1}{4} (0,328 + 2 \cdot 0,254 + 0,234) = 0,2675 \frac{m^3}{h} = 963 \frac{m^3}{h}$$

- 17 Es ist ein ökonomischer Variantenvergleich mit einer Meterbrunnenanlage von Vertikalbrunnen zu führen. Außerdem sollte eine Horizontalfilterbrunnenanlage mit 2 Brunnen untersucht werden (Bild 7 der Beispiele).



Bei dieser Brunnenanordnung ist die Ermittlung der Größe  $h_B$  des Ersatzbrunnens nach WAFRO 1.42. Bl. 2 nicht möglich. Es sind dazu Modelluntersuchungen erforderlich.

Bild 7

Tabelle 3

Algo- rithmus Nr.	Sektor					
	Punkt	P <sub>0</sub>	P <sub>1</sub>	P <sub>2</sub>	P <sub>3</sub>	
2	r [m]	286,0	214,5	296,0	361,0	
	α [°]	0	8,1	15,7	4,8	
3	ψ <sub>2</sub> (P <sub>1</sub> )	2,92	2,20	2,94	3,32	
2;3	Q [m <sup>3</sup> /s]	0,255	0,328	0,254	0,234	
2	h <sub>n</sub> [m]	25,35	25,20	25,35	25,55	
3	h <sub>E</sub> [m]	20,13				
	h <sub>H</sub> [m]	20,13				
4	h <sub>B</sub> [m]	12,35	12,20	12,35	12,55	
5	L [m]	25,0				
	L, L/2 [m]	25,0	12,5	35,0	30,0	
6	Q <sub>Sp</sub> <sup>*</sup> [l/s] nach Anlage 3/3	4,6	5,6	4,1	5,1	
	v <sub>R</sub> <sup>*</sup> = 0,0576 · Q <sub>Sp</sub> <sup>*</sup> [cm/s]	265	323	236	294	
	v <sub>R</sub> <sup>*</sup> /v <sub>a</sub> für v <sub>a</sub> = 6,94 cm/s	38,2	46,5	34,0	42,4	
	β nach Tabelle 2	0,98	1,00	0,94	0,99	
	Q <sub>Sp</sub> = β · Q <sub>Sp</sub> <sup>*</sup> [l/s]	4,5	5,6	3,9	5,0	
9	v <sub>R</sub> = 0,0005 Q <sub>Sp</sub> [cm/s]	2,25	2,80	1,95	2,50	
	v <sub>kr</sub> [cm/s] nach Anlage 6	0,5				
11	s <sub>0</sub> [m]	9,00				
13	s <sub>OH</sub> [m]	3,78	3,93	3,78	3,58	
	h <sub>R</sub> /h <sub>H</sub>	0,646				
	f nach Anlage 2/2	0,99				
	tan α (Anlage 2/1)	2,05	2,35	2,20	1,86	
16	n nach Anlage 2/1	8				
	v <sub>R</sub> /v <sub>kr</sub> für v <sub>kr</sub> = 0,5 cm/s	4,5	5,6	3,9	5,0	
	Variante 1	v <sub>v</sub> [m/h]	0,1	0,1	0,1	0,1
	w <sub>B</sub> [mm]	2,5	2,0	2,2	3,0	
	Variante 2	v <sub>v</sub> [m/h]	0,3	0,65	0,1	0,45
w <sub>B</sub> [mm]	2,0	2,0	2,0	2,0		
7	Q <sub>Sp</sub> /k [m <sup>2</sup> ]	9,0	11,2	7,8	10,0	
	h <sub>St</sub> 1 [m] nach Anlage 4	0,90				
	b <sub>St</sub> /2 [m] nach Anlage 4	1,26	1,05	1,20	1,23	
	b <sub>St</sub> = 2 · 0,7 · b <sub>St</sub> <sup>*</sup> /2 [m]	1,76	1,47	1,68	1,72	
	m <sub>Sp</sub> [t/m]	0,300				
	m <sub>Sp</sub> /s <sub>B</sub> · b <sub>St</sub> mit s <sub>B</sub> = 2,65 t/m <sup>3</sup>	0,0643	0,0770	0,0674	0,0658	
	(n <sub>II</sub> - n <sub>n</sub> )/(n <sub>max</sub> - n <sub>n</sub> ) nach Anlage 5	0,545	0,580	0,553	0,548	
10	n <sub>II</sub> - n <sub>n</sub>	0,0218	0,0232	0,0221	0,0219	
	h <sub>St</sub> <sup>*</sup> = [1/(n <sub>II</sub> · n <sub>n</sub> )] · m <sub>Sp</sub> /s <sub>B</sub> · b <sub>St</sub> [m]	2,95	3,32	3,05	3,00	
	C <sub>1</sub> nach Tabelle 4	3,74	3,50	3,62	3,90	
	C <sub>2</sub> nach Tabelle 5	0,91	0,98	0,94	0,87	
	d <sub>wR</sub> = C <sub>1</sub> · C <sub>2</sub> · d <sub>w</sub> [mm]	1,8	1,8	1,8	1,8	
	d <sub>wR</sub> /d <sub>w</sub>	3,40				
	m [mm] nach Anlage 7	69				
12	d <sub>wI</sub> /d <sub>w</sub> nach Anlage 7	1,50				
	b <sub>St</sub> /2 [mm]	880	840	860	915	
	n <sub>II</sub> = (n <sub>II</sub> - n <sub>n</sub> ) + n <sub>n</sub>	0,3318	0,3321	0,3319	0,3322	
	(1 - n <sub>II</sub> )/n <sub>II</sub>	2,01	2,01	2,01	2,01	
	k <sub>n</sub> /k <sub>II</sub>	0,82	0,82	0,82	0,82	
	1 - k <sub>n</sub> /k <sub>II</sub>	0,18	0,18	0,18	0,18	
	(b <sub>St</sub> /2) · (1 - k <sub>n</sub> /k <sub>II</sub> )	3,390	3,360	3,375	3,412	
	r <sub>IE</sub> <sup>(k<sub>n</sub>/k<sub>II</sub>)</sup> = 143 <sup>(k<sub>n</sub>/k<sub>II</sub>)</sup> [mm]	58,5	58,5	58,5	58,5	
	r <sub>E</sub> [mm]	198	197	197	200	
	r <sub>E</sub> [m]	0,20	0,20	0,20	0,20	

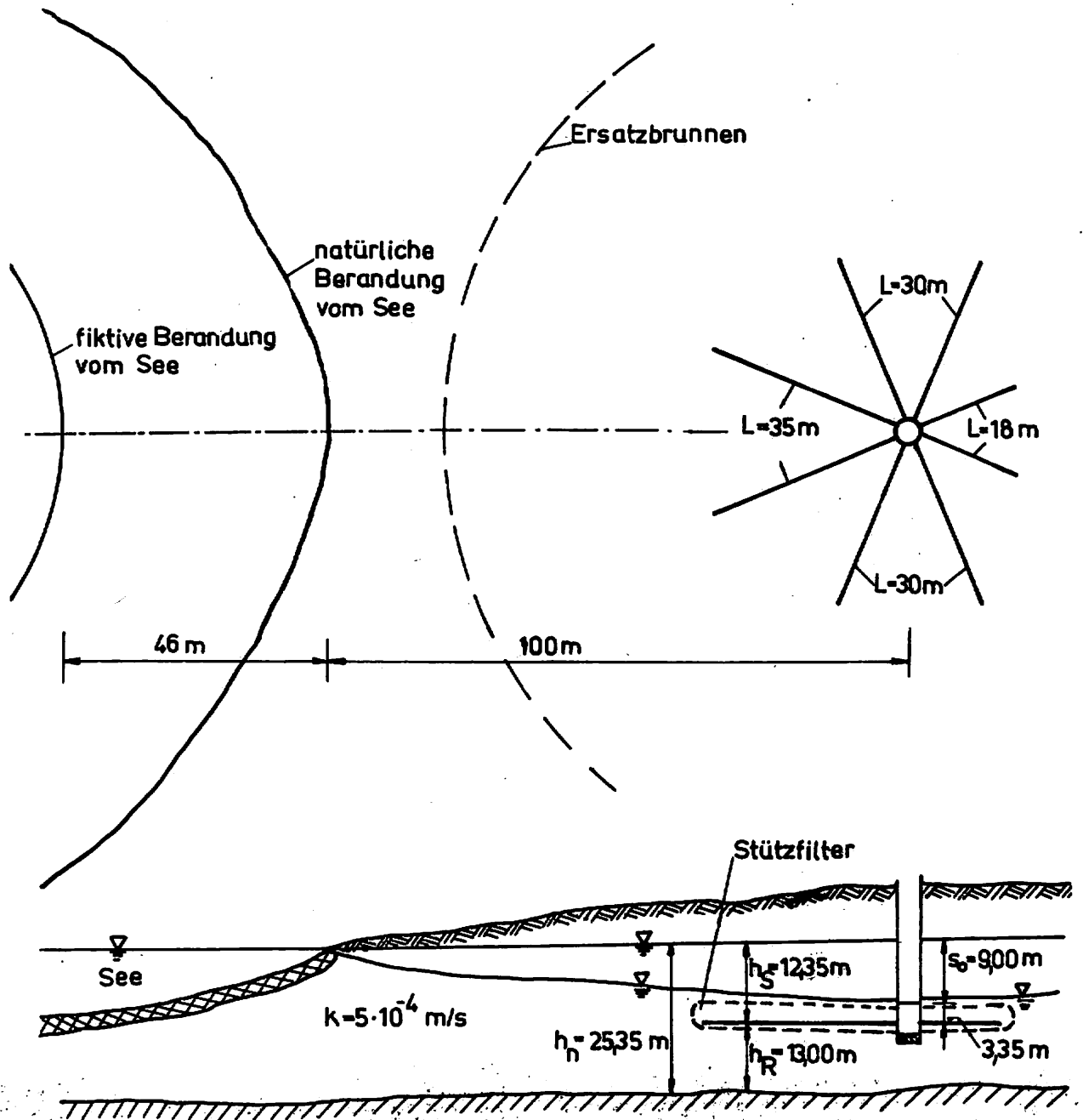


Bild 8

Förderleistung des H.Br. bei  $s_o = 9,00 \text{ m}$  :  $Q = 0,270 \text{ m}^3/\text{s}$   
 Schlitzweite im Filterrohr :  $w_s = 2,0 \text{ mm}$   
 Schlitzweite im Vortriebskopf :  $u = 12,0 \text{ mm}$

Anhang zum Beispiel 3

Die den Stützfilterquerschnitt kennzeichnenden Größen und die Größe, die auf die Sicherheit gegen Versandung ( $\eta = 2,0$  zugrunde gelegt) Einfluß haben, sind in Abhängigkeit von der Vortriebslänge  $L = 0$  bis  $40$  m in Tabelle 4 der Beispiele errechnet. Davon sind in Bild 9 der Beispiele Spülgutmenge  $Q_{Sp}$ , die Vortriebsgeschwindigkeit  $v_v$ , die Stützfilterhöhen  $h_{St}^*$ ,  $h_{St}^2$  und die Stützfilterbreite  $b_{St}$  in Abhängigkeit von der Vortriebslänge  $L$  aufgetragen. In Bild 10 der Beispiele sind für die Vortriebslängen  $L = 0$  m,  $L = 10$  m und  $L = 40$  m die Stützfilterquerschnitte dargestellt.

Tabelle 4

Algo- rithmus Nr.	Vortriebslänge L m	0	5	10	20	30	40
6	$Q_{Sp}^* [l/s]$ nach Anlage 3/3	8,2	6,7	5,8	4,9	4,4	3,9
	$v_R^* = 0,0576 \cdot Q_{Sp}^* [cm/s]$	472	386	334	282	253	225
	$v_R^*/v_B$ für $v_B = 6,94 cm/s$	68,0	55,6	48,1	40,6	36,5	32,4
	$\beta$ nach Tabelle 2	1,00	1,00	1,00	0,99	0,96	0,90
	$Q_{Sp} = \beta \cdot Q_{Sp}^* [l/s]$	8,20	6,70	5,80	4,85	4,22	3,51
9	$v_R = 0,0005 \cdot Q_{Sp} [cm/s]$	4,10	3,35	2,90	2,42	2,11	1,75
16	$v_R/v_{kr}$ für $v_{kr} = 0,5 cm/s$	8,20	6,70	5,80	4,85	4,22	3,51
	$v_v [\frac{m}{h}]$ für $w_B = 2 mm$	1,15	1,00	0,70	0,40	0,20	0,08
7	$Q_{Sp}/k [m^2]$	16,40	13,40	11,60	9,70	8,44	7,02
	$h_{St}^* [m]$ nach Anlage 4	1,08	0,95	0,90	0,82	0,76	0,70
	$b_{St}^*/2 [m]$ nach Anlage 4	1,52	1,40	1,29	1,18	1,10	1,00
	$b_{St} = 2 \cdot 0,7 \cdot b_{St}^*/2 [m]$	2,13	1,96	1,81	1,65	1,54	1,40
	$m_{Sp} [t/m]$	0,300					
	$\frac{m_{Sp}}{\rho_s \cdot b_{St}^*}$ mit $\rho_s = 2,65 t/m^3$	0,0531	0,0578	0,0625	0,0686	0,0735	0,0809
	$\frac{n_{II} - n_n}{n_{max} - n_n}$ nach Anlage 5	0,513	0,522	0,540	0,553	0,565	0,595
	$\frac{n_{II} - n_n}{n_{II} - n_n}$	0,0205	0,0209	0,0216	0,0221	0,0226	0,0238
	$h_{St}^* = \frac{1}{\frac{n_{II} - n_n}{n_{II} - n_n} \cdot \rho_s \cdot b_{St}^*} [m]$	2,59	2,77	2,90	3,10	3,25	3,40
	$G_1$ nach Tabelle 4	4,50	4,07	3,82	3,43	3,15	2,78
10	$G_2$ nach Tabelle 5	0,68	0,79	0,89	1,00	1,09	1,23
	$d_{WR} = G_1 \cdot G_2 \cdot d_{wn} [mm]$	1,6	1,7	1,8	1,8	1,8	1,8
	$d_{WR}/d_{wn}$	$\approx 3,40$					
	$m [mm]$ nach Anlage 7	69					
	$d_{WI}/d_{wn}$ nach Anlage 7	1,50					
12	$r_{IE} = (r_R + m)^{(1-c)} \cdot r_R^c$ , $c = \frac{1}{(\frac{d_{WI}}{d_{wn}})^2} = \frac{1}{1,50^2} = 0,444$ ; $r_R = 108 mm$						
	$r_{IE} = (108 + 69)^{(1-0,444)} \cdot 108^{0,444} = 143 mm$						
	$\frac{n_n}{1-n_n} = \frac{0,31}{1-0,31} = 0,45$						
	$b_{St}/2 [mm]$	1065	980	905	825	752	700
	$n_{II} = (n_{II} - n_n) + n_n$	0,3305	0,3309	0,3316	0,3321	0,3326	0,3338
	$(1-n_{II})/n_{II}$	2,03	2,02	2,02	2,01	2,01	2,00
	$\frac{k_n}{k_{II}} = \left[ \frac{n_n}{1-n_n} \cdot \frac{1-n_{II}}{n_{II}} \right]^2$	0,834	0,826	0,826	0,818	0,818	0,810
	$1 - k_n/k_{II}$	0,166	0,174	0,174	0,182	0,182	0,190
	$(b_{St}/2)^{(1-k_n/k_{II})}$	3,18	3,31	3,27	3,40	3,34	3,47
	$r_{IE}^{(k_n/k_{II})}$	62,7	60,3	60,3	58,0	58,0	55,7
$r_{IE} = (b_{St}/2)^{(1-k_n/k_{II})} \cdot r_{IE}^{(k_n/k_{II})} [mm]$	199	200	197	197	194	193	
$r_E [m]$	0,20	0,20	0,20	0,20	0,19	0,19	

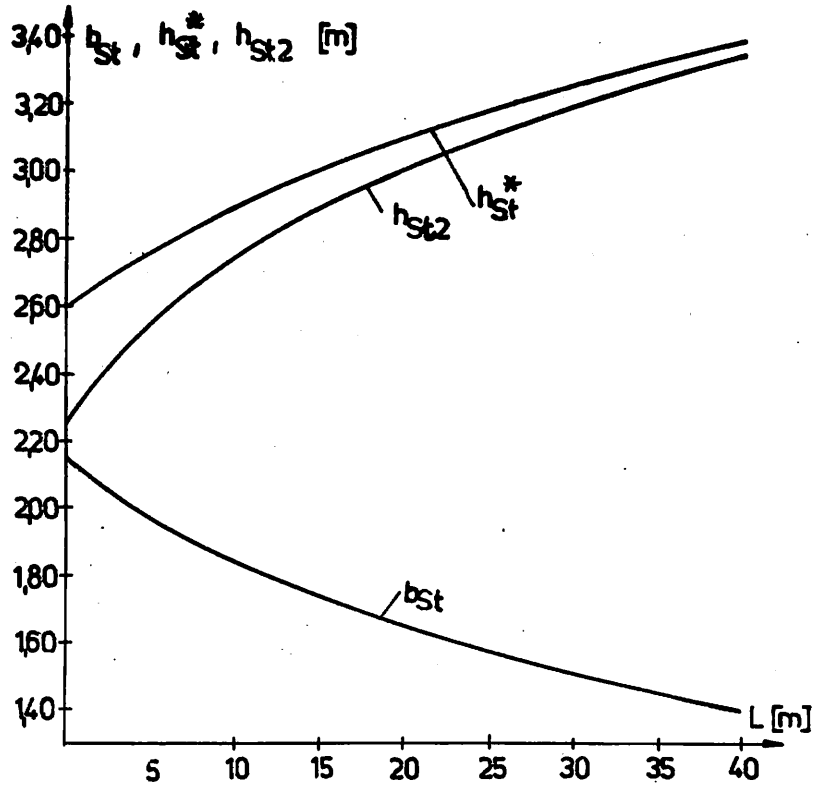
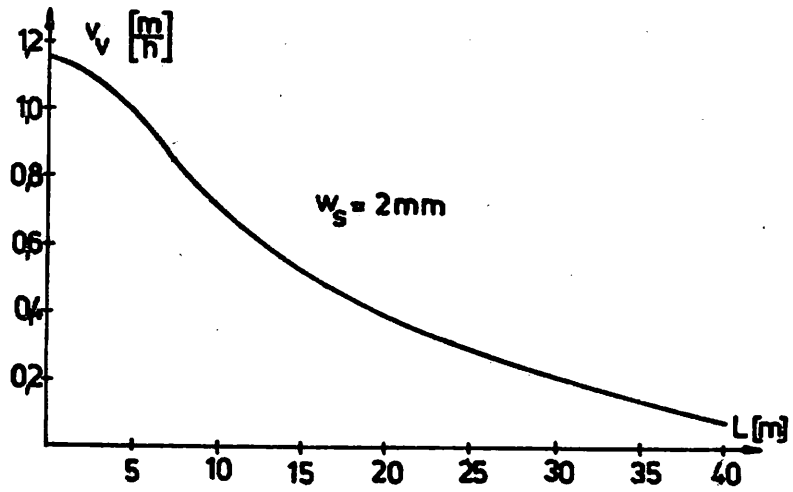
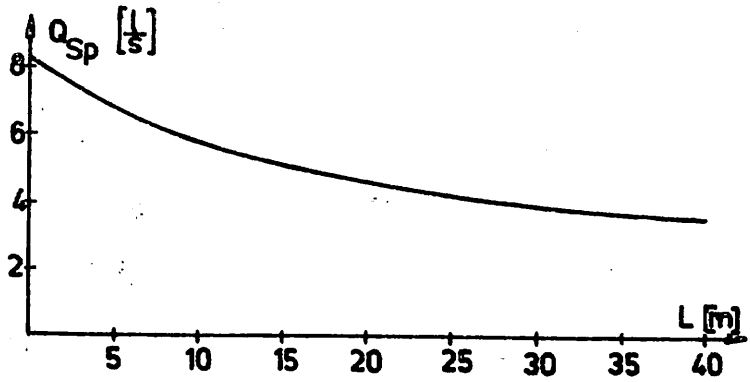
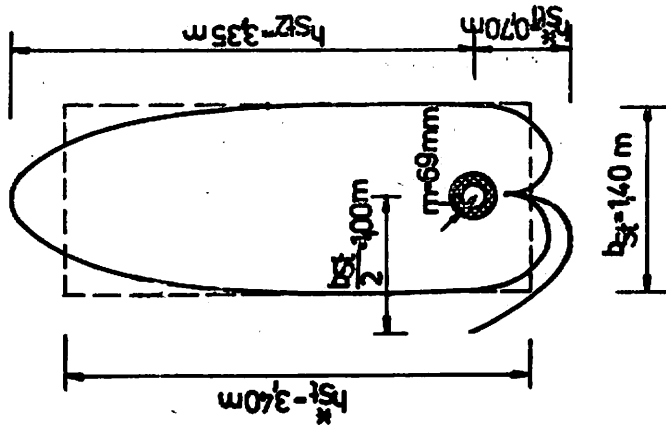
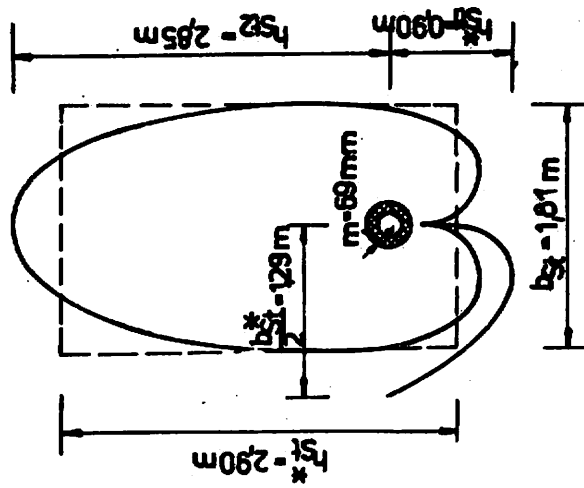


Bild 9

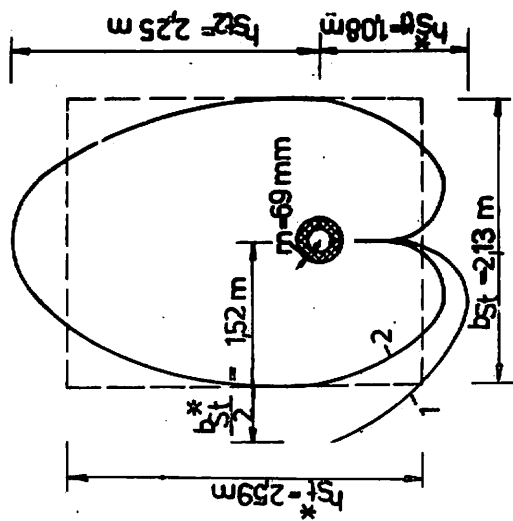




bei L=40 m



bei L=10 m



bei L=0 m (am Sammelschicht)

Bild 10 Stützfilterquerschnitte

Literaturverzeichnis

- [1] WAFRO 1.42. Blatt 1 2.71: Bemessungsgrundlagen für Brunnen von Grundwasser-  
gewinnungsanlagen; Grundsätze  
WAFRO 1.42. Blatt 2 2.71: -; Geohydraulische Berechnungen  
WAFRO 1.42. Blatt 3 2.71: -; Konstruktion und Gestaltung von Brunnenfiltern  
WAFRO 1.42. Blatt 4 2.71: -; Verfahrensweg und Berechnungsbeispiele
- [2] WAFRO 4.04. Blatt 2 10.70: Nachweis der Beständigkeit von Erdstoffen gegenüber der  
Einwirkung der Sickerwasserströmung;  
Suffosion nichtbindiger Erdstoffe  
WAFRO 4.04. Blatt 3 10.70: -; Kontakterosion Typ 1/1, 1/3 und 3/1 sowie Durchlässig-  
keitsregeln für Filter aus nichtbindigen Erdstoffen  
Hinweise für die Konstruktion von Wasserbaufiltern  
WAFRO 4.04. Blatt 4 1.69: -; Kontakterosion Typ 2/2, 3/2, 2/3- und 3/3 bei nicht-  
bindigen Erdstoffen  
WAFRO 4.04. Blatt 5 1.70: -; Kontakterosion bindiger Erdstoffe
- [3] Anatol'evskij, P.A., Gal'perin, L.V.:  
Vodozabor podzemnych vod (Wasserfassung von Grundwasser)  
izdatel'stvo literatury po stroitel'stvu, Moskva 1965, 117 S.
- [4] Beyer, W.:  
Zur Analyse der Grundwasserfließbewegung, Wissenschaftliche Zeitschrift der  
TU Dresden 16 (1967) 4, S. 1043-1048
- [5] Beyer, W., Schweiger, K.H.:  
Zur Bestimmung des entwässerbaren Porenanteils der Grundwasserleiter,  
WWT 19 (1969) 2, S. 57-60
- [6] Čištín, J.:  
Zum Problem mechanischer Deformationen nichtbindiger Lockergesteine durch die Sicker-  
wasserströmung in Erddämmen, Wasserwirtschaft - Wassertechnik 17 (1967) 2, S. 45 - 49
- [7] Falcke, P.-K.:  
Versuche über die Strömungsvorgänge an Brunnen mit horizontalen Fassungssträngen,  
Dissertation 1952, TH Karlsruhe
- [8] Fanger, G., Glöck, H.-J., Radestock, K.-D.:  
Der Bau von Horizontalfilterbrunnen, Bauplanung - Bautechnik 17 (1963) 3, S. 118 - 122
- [9] Finke, Stibbe:  
Horizontalvortrieb von PVC-Filterrohren nach dem Prinzip des Ranney-Verfahrens,  
Forschungsbericht d. VE Spezialbaukombinat Magdeburg
- [10] Gütschow, J.:  
Anfahr- u. Leistungsversuche an Horizontalfilterbrunnen Tettau,  
WWT 18 (1968) 11/12, S. 375 - 379
- [11] Hünerberg, K.:  
Untersuchungen an Horizontalfilterbrunnen im Berliner Raum  
GWF 100 (1959) 34, S. 862 - 870
- [12] Ingenieur-Taschenbuch Bauwesen Bd. III  
BG Teubner Verlagsgesellschaft Leipzig 1965
- [13] Isbaš, S.V.:  
Fil'tracionnye deformaicii gruntov (Deformationen der Böden bei Durchsickerung)  
Izvestija NIIG, Leningrad, 1933, Heft 10
- [14] Jäkel, G., Riempp, G.:  
Der Horizontalfilterbrunnen Tettau  
WWT 12 (1962), Heft 6/7, S. 239 - 248 und 314 - 324

- [15] Kezdi:  
Handbuch der Bodenmechanik, Bd. 1 Bodenphysik, VEB Verlag für Bauwesen Berlin,  
Verlag der Ungarischen Akademie der Wissenschaften Budapest 1969
- [16] Kittner, H., Starke, W., Wissel, D.:  
Wasserversorgung  
VEB Verlag für Bauwesen Berlin 1967
- [17] Kozlova, L.J.:  
Eksperimental'nye issledovanija fil'tracionnyh deformacij  
dvuch smežnyh raznovodnyh sloev grunta (Experimentelle Untersuchung über die Verfor-  
mungen zweier benachbarter verschiedenartiger Bodenschichten bei Durchsickerung)  
Izv. VNIIG, Leningrad, 1934, Heft 14
- [18] Luckner, L. u.a.:  
Brunnen für Grundwassergewinnungsanlagen, Studie zu den Bemessungsgrundlagen des  
WAERO 1.42. - Werkstandard des VEB Projektierung Wasserwirtschaft Halle
- [19] Miłcarek, W.:  
Anwendung des Saugspülschichtbohrverfahrens zur Herstellung von Horizontalfilterbrunnen  
Spezialbau-Mitteilungen, Reihe Brunnen- und Grundbau des VE Spezialbaukombinat Magde-  
burg, Sonderheft über Fachtagung Horizontalfilterbrunnen am 26. u. 27. 10. 1967 in  
Magdeburg, S. 104 - 130
- [20] Mostkow, M.A.:  
Handbuch der Hydraulik  
VEB Verlag Technik Berlin 1956
- [21] Nahrgang, G., Falcke F.-K.:  
Modellversuche über Strömungsvorgänge an Horizontalfilterbrunnen  
GW 95 (1954) 4, S. 111 - 119
- [22] Offerhaus, P.:  
Die Horizontalfilterbrunnen in der Theorie und in der Praxis  
Dissertation 1961 TH Karlsruhe
- [23] Radestock, K.-D.:  
Die Herstellung von Senkbrunnen und horizontalen Filtervortrieben im  
VE Spezialbaukombinat Magdeburg  
Spezialbau-Mitteilungen, Reihe Brunnen- und Grundbau des VE Spezialbaukombinat Magdeburg,  
Sonderheft über Fachtagung Horizontalfilterbrunnen am 26. u. 27. 10. 1967 in Magdeburg,  
S. 74 - 103
- [24] Razumov, G.A.:  
Lučevye vodozabory dlja vodosnabženija gorodov i promyšlennosti (Strahlenförmige Wasser-  
fassungen für die Wasserversorgung von Städten und der Industrie)  
Min. kommunal'n chozjajstva RSFSR  
Moskva, 1961, 57 S.
- [25] Rückert, H.:  
Über den Stützfilteraufbau an Strängen bei Horizontalfilterbrunnen  
Wissenschaftliche Zeitschrift der Hochschule für Bauwesen  
Leipzig 28 (1967) 3, S. 129 - 137
- [26] Rückert, H.:  
Die Vortriebstechnologie der Horizontalfilterstränge in Abhängigkeit vom Stützfilter-  
aufbau  
Forschungsbericht 1967, F.-/E.-Stelle: Hochschule für Bauwesen Leipzig,  
Institut für Grundbau und Baugrundmechanik
- [27] Rückert, H.:  
Stand des Horizontalvortriebes und Vorschläge für die Weiterentwicklung  
Spezialbau-Mitteilungen, Reihe Brunnen- und Grundbau des VE Spezialbaukombinat Magdeburg  
Sonderheft über Fachtagung Horizontalfilterbrunnen am 26. und 27. 10. 1967 in Magdeburg,  
S. 133 - 160

- [29] Stack, H.:  
Hydraulische Untersuchungen an zwei Horizontalfilterbrunnen  
GWF 99 (1958) 12, S. 265 - 268
- [30] Varga, J.:  
Erkenntnisse beim Bau von Horizontalfilterbrunnen in Ungarn  
Spezialbau-Mitteilungen, Reihe Brunnen- und Grundbau des VE Spezialbaukombinat Magdeburg  
Sonderheft über Fachtagung Horizontalfilterbrunnen am 26. und 27. 10. 1967 in Magdeburg,  
S. 227 - 243
- [31] Ziems, J.:  
Beitrag zur Kontakterosion nichtbindiger Böden  
Dissertation, TU Dresden, Sektion Wasserwesen 1969