

S t u d i e
über die
B r u n n e n a l t e r u n g

von Dipl.-Ing. Gerhard Krems, Berlin
im Auftrage des Bundesministeriums des Inneren,
Unterabteilung Wasserwirtschaft

Dezember 1972

I n h a l t

1. Allgemeines
2. Ursachen der Brunnenalterung
 - 2.1 Versandung
 - 2.2. Korrosion
 - 2.3. Versinterung
 - 2.4. Verockerung
 - 2.4.1 Chemische Verockerung ohne Sauerstoffzufuhr
 - 2.4.2 Chemische Verockerung infolge direkter Sauerstoffzufuhr
 - 2.4.3 Chemische Verockerung infolge indirekter Sauerstoffzufuhr
 - 2.4.4 Physikalisch begünstigte Verockerung
 - 2.4.5 Biologische Verockerung
 - 2.4.6 Einfluß des Brunnenmaterials
 - 2.4.7 Gefährdeter Brunnenbereich
 - 2.4.8 Zeitlicher Verlauf
 - 2.4.9 Verockerung von Dränrohren
 - 2.5. Sonstige Ursachen
- 2.6. Einfluß der Betriebsweise eines Brunnens
- 2.7. Methoden zur Feststellung der Brunnenalterung
 - 2.7.1 Lotung
 - 2.7.2 Unterwasseraufnahme
 - 2.7.3 Messung von Wasserspiegeldifferenzen
- 2.8. Regenerierung von Brunnen
- 2.9. Konsequenzen für Bau, Betrieb und Überwachung von Trinkwassernotbrunnen
 - 2.9.1 aus Versandung
 - 2.9.2 " Korrosion
 - 2.9.3 " Versinterung
 - 2.9.4 " Verockerung
 - 2.9.5 Zusammenfassung
- 2.10. Schlußwort
- 2.11. Literaturverzeichnis

1. A l l g e m e i n e s

Sehr viele Brunnen haben leider die unangenehme Eigenschaft, daß ihre Leistung mit der Zeit immer mehr zurückgeht, bis ein Punkt erreicht ist, an dem die Leistung für die Aufgabe, für die der Brunnen einmal gebaut worden ist, nicht mehr ausreicht. Dieser Zeitpunkt kann sich schon nach wenigen Jahren einstellen. Allgemeingültige Angaben über die zu erwartende Lebensdauer eines Brunnens, innerhalb der er eine ausreichende Leistung haben wird, können nicht gemacht werden. Dazu ist die Lebensdauer von zu vielen Faktoren abhängig, insbesondere von den örtlichen Untergrund- und Wasserverhältnissen sowie von der jeweiligen Brunnenbauweise.

Diese Faktoren, auf die im folgenden noch näher eingegangen wird, führen zu einem allmählichen Zuwachsen oder Verstopfen der Filterrohrschrütze, der Poren der Kiesschrüttung und in manchen Fällen auch noch zu einem Zuwachsen der Poren des Grundwasserleiters in der unmittelbaren Umgebung des Brunnens. Der Fließquerschnitt für das Grundwasser, das sich auf das Filterrohr zu bewegt und in das Filterrohr eintreten will, wird dadurch sehr stark eingeengt oder sogar völlig verschlossen. Die Folge ist ein starkes Anwachsen des Durchflußwiderstandes in der Kiesschrüttung sowie des Eintrittswiderstandes in das Filterrohr. Das Grundwasser kann infolge dieser Widerstände dann oft nicht mehr in ausreichendem Maße in den Brunnen gelangen.

Dieser Vorgang wird im Brunnenbetrieb allgemein mit dem Sammelbegriff Brunnenalterung bezeichnet.

Darunter fällt allerdings nicht ein Rückgang der Brunnenleistung, der durch hydrologische Veränderungen seit dem Bau des Brunnens bedingt ist. Eine solche Veränderung könnte z.B. ein natürliches Nachlassen der Ergiebigkeit des Grundwasservorkommens sein. Das gleiche gilt für den

hydrologisch falschen Bau und Betrieb einer Brunnengalerie, durch die das Grundwasservorkommen dauernd überfordert wird oder deren Brunnen sich in ständig steigendem Maße gegenseitig zu stark beeinflussen.

2. Ursachen der Brunnenalterung

2.1. Versandung

Die Versandung ist ein rein physikalischer Vorgang, bei dem die "Schleppkraft" des Grundwassers und deshalb die richtige Dimensionierung der Kiesschüttung eine Rolle spielen.

- 2.11 Wenn die Fördermenge und damit die Grundwassergeschwindigkeit in Brunnennähe zu groß wird, werden Sand und Ton aus dem Grundwasserleiter herausgeschwemmt und vom Grundwasser zum Brunnen hin transportiert. Das kann zu einem laufenden Sandeintrieb und - als Folge - zur allmählichen Versandung des Brunnens oder zu einer immer größeren Verstopfung der Poren der Kiesschüttung, also des Durchflußquerschnittes führen.

Angaben über die Zusammenhänge zwischen der Grundwassergeschwindigkeit und dem Wanderungsbeginn von Bodenpartikeln bestimmten Durchmessers sind in der Literatur nur spärlich vorhanden.

Bei Preß (48) finden sich folgende Werte:

Korngröße (mm) \leq 0,25 0,25/0,5 0,5/1,0 1,0/ 2,0 2,0/ 3,0

Geschwindigkeit \leq 2,9 3,5 /6,9 7,5/9,6 11,0/17,0 17,9/18,2
(cm/s)

Die Zahlen besagen, daß z.B. bei einer Grundwassergeschwindigkeit von 2,9 cm/s ein Sandkorn mit einem Durchmesser von 0,25 mm gerade noch in Ruhe bleibt. Ob diese Werte, die im Bild 1 graphisch dargestellt sind, auf

Versuchen oder Erfahrungswerten basieren, konnte nicht festgestellt werden.

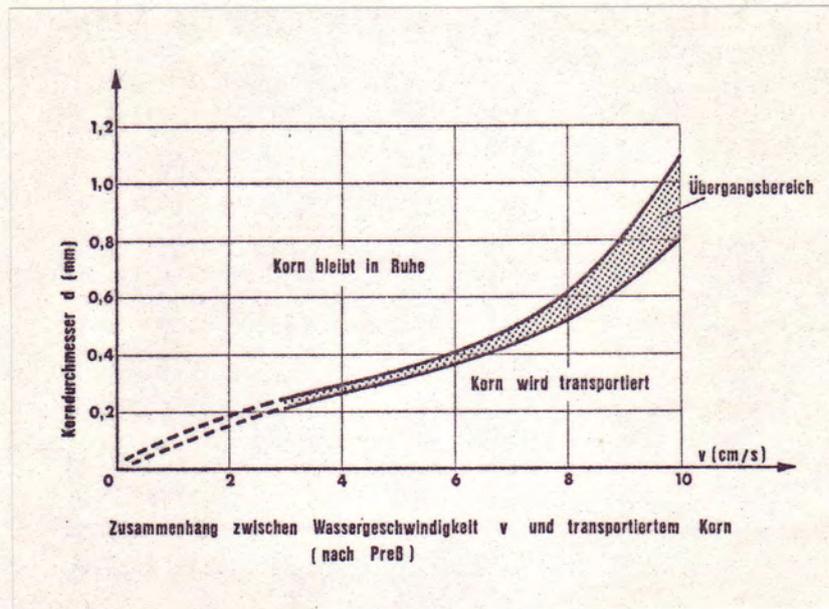


Bild 1

Groß (19) empfiehlt aufgrund seiner Erfahrungen, folgende maximale Geschwindigkeiten am Übergang zwischen gewachsenem Boden und Brunnen nicht zu überschreiten:

$v_f \leq 2$	mm/s	wenn 40 % der Sieblinie < 1	mm
≤ 1	mm/s	$< 0,5$	mm
$\leq 0,5$	mm/s	$< 0,25$	mm

Die zulässigen Brunnenleistungen, die sich aufgrund dieser Erfahrungswerte ergeben, sind im Bild 2 als Kurven aufgetragen.

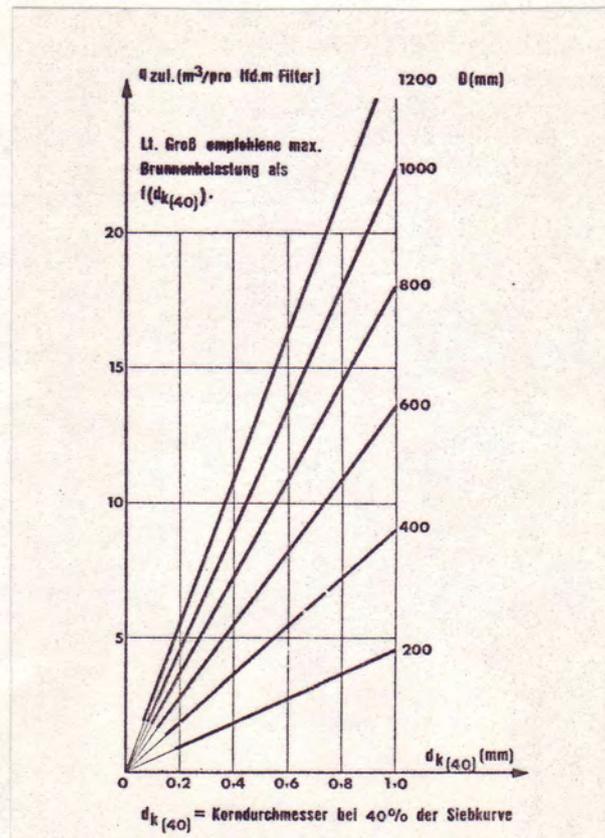


Bild 2

Untersuchungen aus neuester Zeit, die auf Versuchen mit natürlichen Böden basieren, liegen lediglich vom Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft der TU Berlin vor (56). Hier wurde festgestellt, bei welcher kritischen Grundwassergeschwindigkeit ein bestimmtes Bodenkorn zu wandern beginnt. Da durch die Versuche insbesondere die Vorgänge im kritischen Bereich eines Brunnens, nämlich am Übergang zwischen gewachsenem Boden und Kiesschüttung geklärt werden sollten, sind die Ergebnisse u.a. auch Funktionen des Korndurchmessers der äußeren Kiesschüttung. Das Versuchsergebnis $Re_{krit.} = v_{f\ krit.} \cdot D_{50}/\nu$ (Bild 3) ist in Bild 4 vom Verfasser für verschiedene Korndurchmesser d

und D auf v_f kritisch umgerechnet worden. Die zulässige Brunnenleistung hinsichtlich eines Mitreißen von Sand kann daraus leichter ermittelt werden.

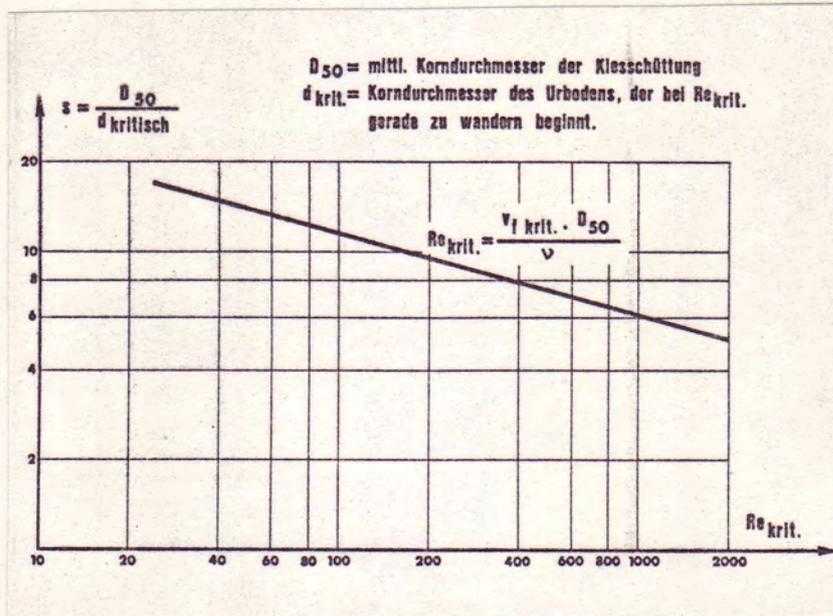


Bild 3

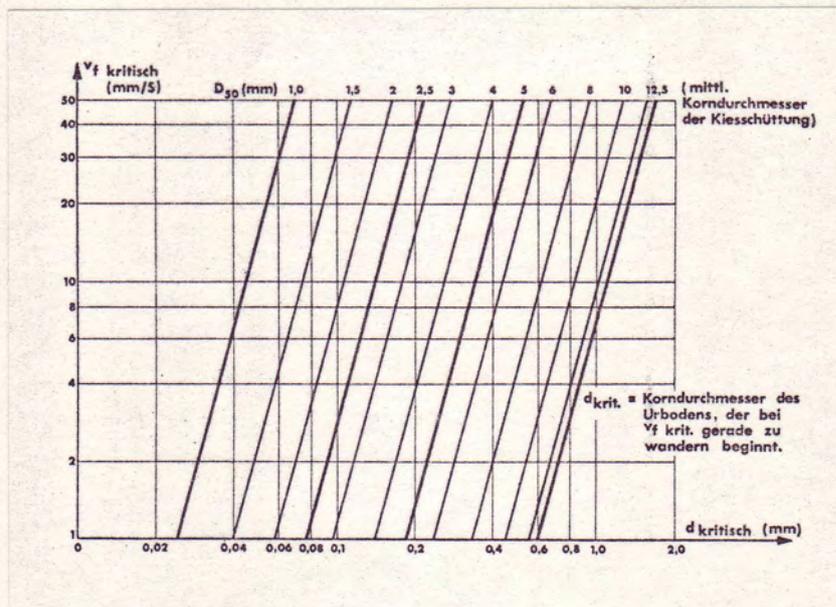


Bild 4

Es sei hier nicht verschwiegen, daß der Verfasser die Ergebnisse der zuletzt genannten Untersuchungen hinsichtlich der zulässigen Brunnenleistung für zu günstig hält, weil das Versuchsmodell die in der Natur am Brunnen gegebenen Bedingungen nicht voll erfüllt hat. In Wirklichkeit wird ein Sandtransport bereits bei kleineren Geschwindigkeiten als im Versuch eintreten. Die tatsächlichen Werte für v_f kritisch werden aber trotzdem noch so groß sein, daß sie in der Praxis wohl nur selten auftreten werden.

Aufgrund der aufgeführten empfohlenen bzw. zulässigen maximalen Grundwassergeschwindigkeiten am Bohrlochmantel dürfte also ein Brunnen, der in einem grobsandigen Mittelsand der grünen Sieblinie des Bildes 5 mit einem Bohrdurchmesser von $D = 800$ mm abgeteuft und mit $h = 10$ m Filterrohr ausgerüstet worden wäre, mit folgenden Leistungen beansprucht werden. Für d_{kritisch} wird für die Berechnungen hier mit $0,2$ mm ein relativ niedriger Wert gewählt.

a) nach Preß:

$$\text{aus Bild 1: } v_{\text{zul.}} = \text{rd. } 2 \text{ cm/s}$$

$$Q_{\text{zul.}} = D \cdot \pi \cdot h \cdot v = 0,83,14 \cdot 10 \cdot 0,02 \cdot 3600 =$$

$$\underline{Q_{\text{zul.}} = \text{rd. } 1800 \text{ m}^3/\text{h}}$$

b) nach TU-Berlin:

$$\text{aus Bild 5: } D_{50} = \text{rd. } 2-3 \text{ mm} = \text{rd. } 2,5 \text{ mm} \quad (\text{Außen- schüttung})$$

$$\text{" " 4: } v_f \text{ kritisch} = 36 \text{ mm/s}$$

$$\underline{Q_{\text{zul.}} = 0,83,14 \cdot 10 \cdot 0,036 \cdot 3600 = \text{rd. } 3250 \text{ m}^3/\text{h}}$$

c) nach Groß:

$$\text{aus Bild 5: } d_{k(40)} = 0,48 \text{ mm}$$

$$\text{" " 2: } q_{\text{zul.}}(800) = 8,6 \text{ m}^3/\text{h} \text{ pro lfdm Filterrohr}$$

$$\underline{Q_{\text{zul.}} = 8,6 \cdot 10 = 86 \text{ m}^3/\text{h}}$$

Kornverteilungskurve

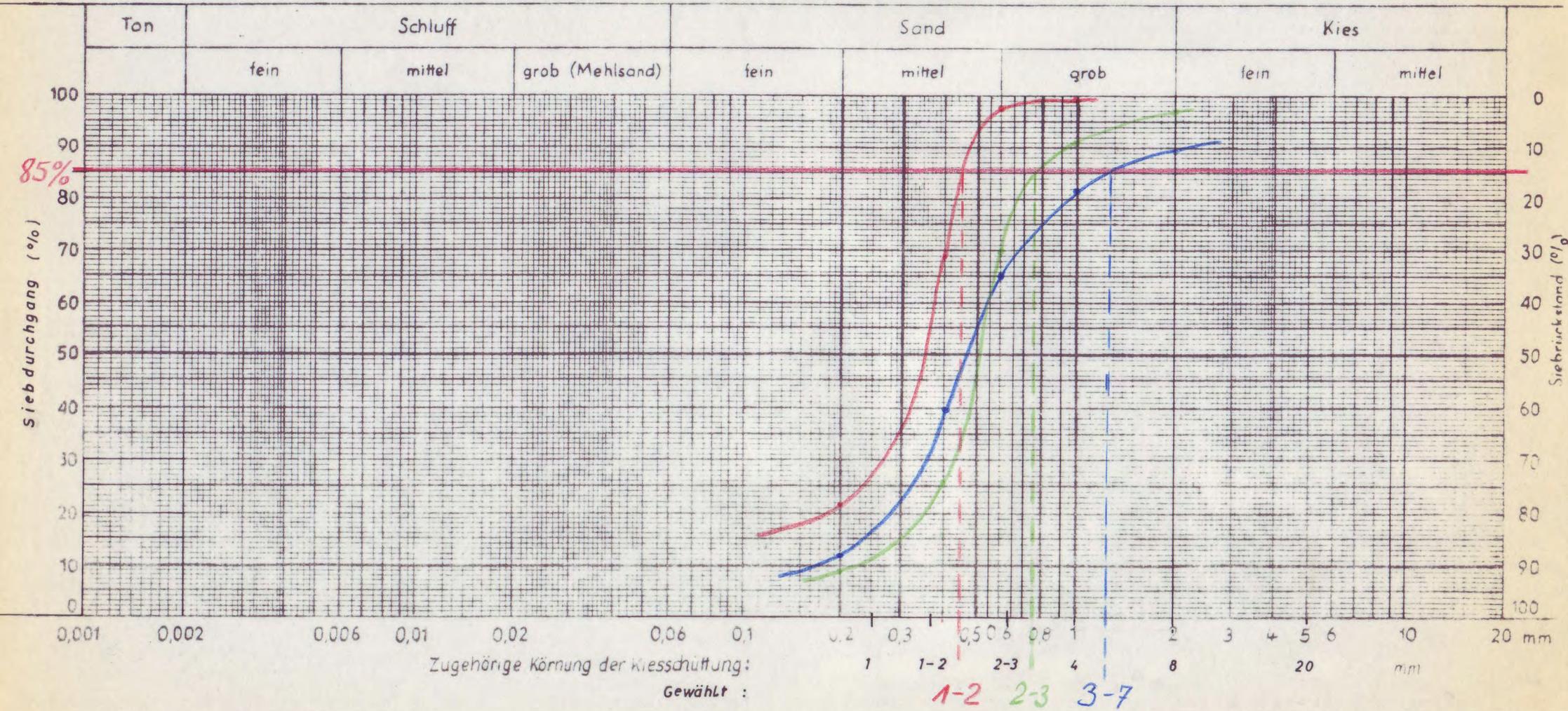


Bild 5

Vorausgesetzt, daß die Kiesschüttung richtig dimensioniert worden ist, wird also ein Brunnen infolge einer Überbeanspruchung im Sinne dieses Abschnittes praktisch nur selten altern, weil - wie die Beispiele a und b zeigen - das Grundwasser für den Sandtransport Geschwindigkeitswerte annehmen muß, die im praktischen Betrieb auch bei höchster Belastung eines Brunnens nur selten erreicht werden.

- 2.12 Um die Versandung eines Brunnens zu verhindern, muß die Körnung der äußeren Kiesschüttung im richtigen Verhältnis auf den jeweils durchbohrten Boden des Grundwasserleiters abgestimmt werden. Weisen die durchbohrten, mit Filterrohren auszubauenden Bodenschichten in ihrer Sieblinie starke Unterschiede auf, so sollte die äußere Kiesschüttung nicht nur - wie es leider heute immer noch üblich ist - auf die feinste Schicht abgestimmt werden. Sie ist dann je nach Feinheitgrad der einzelnen Schichten in der Korngröße zu variieren, wobei die Differenzierung allerdings auch nicht übertrieben werden darf.

Da die sogenannte Turbulenztheorie (siehe Abschnitt 2.4.4) aufgrund der neuesten Erkenntnisse auf die Brunnenalterung nur einen untergeordneten Einfluß hat, ist die Körnung möglichst groß zu wählen. Jedoch nur so groß, daß eine einwandfreie Filterwirkung zum gewachsenen Boden hin gewährleistet ist. Der Vorteil des größeren Kornes liegt darin, daß zwar das Gesamtporenvolumen gegenüber einer feineren Schüttung kleiner ist, daß aber die einzelnen Poren größer sind. Dadurch wird ihr Zuwachsen oder Verstopfen verzögert. Als Vergleich sei die Tatsache angeführt, daß ein Enteisungsfilter umso eher rückgespült werden muß, je feiner die Körnung des Filterkieses ist.

Über die richtige Abstufung der Körnung einer Kiesschüttung auf den anstehenden Boden gibt es verschiedene Auf-

fassungen. Da die Korngröße im Sinne des oben Gesagten in gewissen Grenzen auch einen Einfluß auf die Brunnenalterung haben kann, sollen sie hier erwähnt werden.

Ausgegangen wurde anfangs bei der Korngrößenwahl zunächst nur von den rein geometrischen Verhältnissen zwischen Kiesschüttung und Boden, indem man beide näherungsweise als Kugelschüttungen jeweils gleichen Durchmessers betrachtete. (Bild 6)

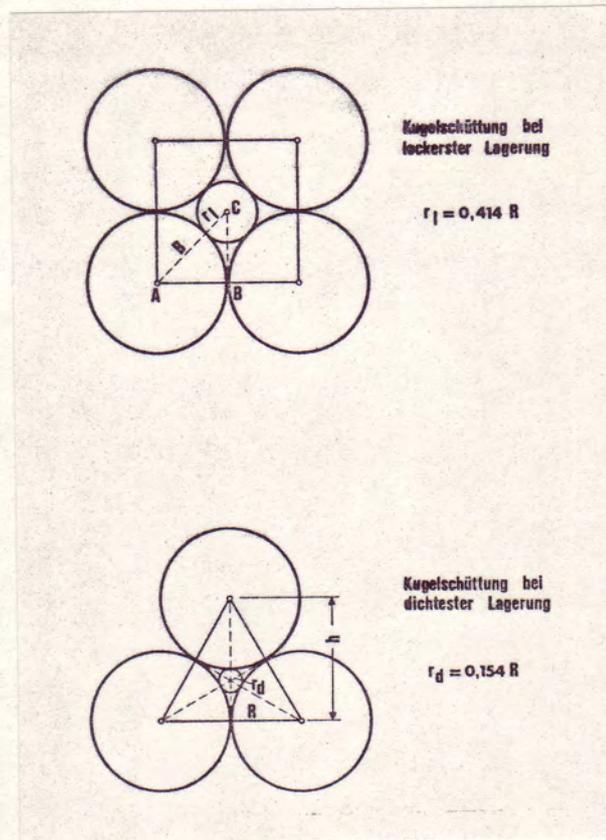


Bild 6

Grundlage war die Überlegung, daß der engste Durchgang in der äußeren Kiesschüttung kleiner sein muß als das Korn des durchteuften Bodens, das man gerade noch zurückhalten möchte. Bei lockerster Lagerung geht durch eine Kies-

schüttung mit dem Korndurchmesser D gerade noch das Bodenkorn hindurch, dessen Korndurchmesser d rd. 2,4 mal kleiner ist; bei dichtester Lagerung beträgt das Verhältnis $S = D/d$ sogar rd. 6,5. In der Natur liegt dieser Wert S , den Sichardt den Filter- oder Sperrfaktor genannt hat, zwischen diesen Grenzen, vermutlich etwas näher an der unteren. Je nach Verfasser schwanken die vorgeschlagenen Sperrfaktoren im allgemeinen zwischen 4 und 5. Lediglich Bertram und Karpoff geben größere Werte an. Ähnlich schwankende Angaben werden über das sogenannte Kennkorn d_K gemacht, das als Grundlage für die Berechnung des Kiesschüttungskornes D mittels des Sperrfaktors dienen soll und das der jeweiligen Sieblinie des durchbohrten Bodens entnommen werden muß. Für das Kennkorn variieren die Werte zwischen d_{30} und d_{90} .

Neueste Untersuchungen basieren auf Versuchen, die das Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft der TU Berlin mit natürlichen Böden durchgeführt hat (16). Hier wird ein Sperrfaktor von $S = D_{50}/d_{85} = 4$ empfohlen, bei einem Kennkorn also, das sich aus der 85 % - Linie der Siebkurve ergibt.

Zweck (63) und Davidenkoff (11) sind bei ihren Versuchen, die ebenfalls erst in den letzten Jahren durchgeführt worden sind, zu etwas anderen Ergebnissen gekommen. Sie haben nämlich gefunden, daß das Problem der richtigen Abstimmung einer Kiesschüttung auf den Urboden nicht allein ein rein geometrisches ist, sondern daß die Stabilität einer Filterkiesschüttung auch vom Grundwassergefälle und damit von der Grundwassergeschwindigkeit sowie vom Bodenkorn abhängig ist. Es wurde nachgewiesen, daß der Sperrfaktor gegenüber den bisherigen Annahmen zum Teil erheblich größer als 4 bis 5 sein kann und keine konstante Größe ist.

Die von Davidenkoff empfohlenen Sperrfaktoren gehen aus Bild 7 hervor, in dem mit D_{50} der mittlere Korndurchmesser

der Kiesschüttung und mit d_{50} der des gewachsenen Bodens bezeichnet ist. Grob verallgemeinert kann man die Empfehlungen von Davidenkoff wie folgt zusammenfassen. Je feiner der durchbohrte Boden ist, umso größer kann der Sperrfaktor sein. Bei Mittelsand z.B. kann er lt. Bild 7 zwischen 8 und 15, bei Grobsand zwischen 4 und 8 liegen. Für Kies ist er mit dem aus den geometrischen Verhältnissen abgeleiteten Wert von 4 identisch.

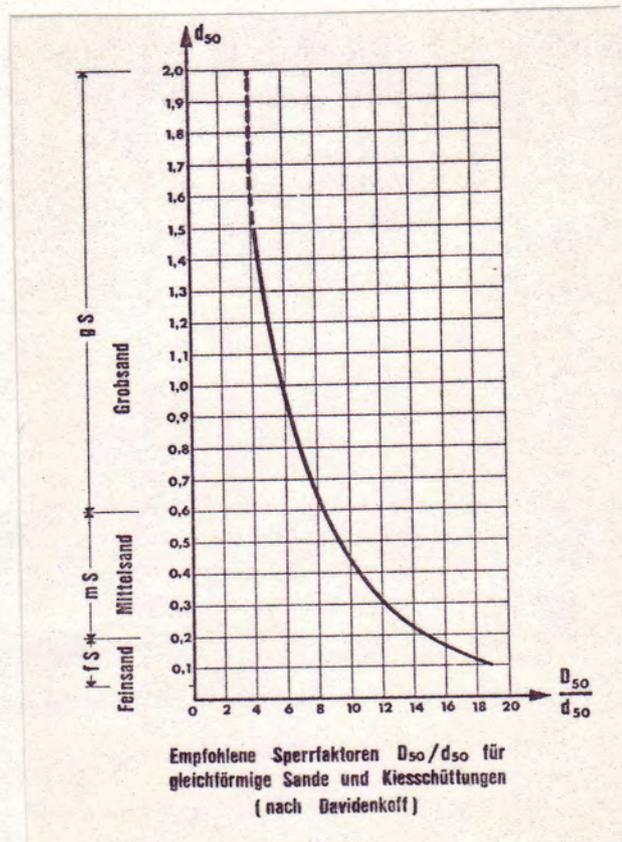


Bild 7

Die Ergebnisse von Davidenkoff sind für den Brunnenbau in dieser Form leider nicht anwendbar, da sie nur für gleichförmige Sandböden und ebenso gleichförmige Kiesschüttungen

gültig sind. Die in der Natur vorkommenden Böden sind aber in den meisten Fällen ungleichförmiger Art. Es ist deshalb wichtig, die Ergebnisse von Davidenkoff für derartige Böden zu ergänzen, um die Stabilitätstheorie eines Filters auf die Bemessung von Brunnenkiesschüttungen anwendbar zu machen. Nahrgang (40) hat in einem noch nicht veröffentlichten Aufsatz Wege dafür aufgezeigt. Entsprechende Untersuchungen werden in absehbarer Zeit durchgeführt werden. Über sie wäre dann zu gegebener Zeit zu berichten.

2.2. K o r r o s i o n

Nach DIN 50900, die z. Zt. in der Entwurfsbearbeitung ist, versteht man unter Korrosion eine Reaktion eines Werkstoffes mit seiner Umgebung, die zu einer Beeinträchtigung der Eigenschaften des Werkstoffes und/oder seiner Umgebung führt. Korrosion soll deshalb vermieden werden, weil sie zur Zerstörung von Brunnentteilen führt und damit deren betriebliche Eignung und Lebensdauer herabsetzt. Darüber hinaus kann das Wasser durch Aufnahme von Korrosionsprodukten, wie z.B. von Eisenionen, chemisch so ungünstig beeinflusst werden, daß sich daraus leistungsmindernde Folgen für die Brunnen ergeben, die im Abschnitt 2.4.4 und 2.4.5 behandelt werden.

Der Begriff der Korrosion erstreckt sich nicht nur auf die Beeinträchtigung bzw. Zerstörung metallischer Werkstoffe, die unter bestimmten Bedingungen eintreten kann, sondern auch auf die anorganischer, nicht-metallischer, wie Asbest, Zement, Beton und Mörtel. Organische Werkstoffe, also Kunststoffe und bituminöse Stoffe, sind in der Regel durch Korrosion nicht gefährdet.

Ein großer Teil der bisherigen Kenntnisse über die Vorgänge bei der Korrosion sind wissenschaftlich überholt. Z.B. wurde das Kalkkohensäuregleichgewicht als ausschlaggebend für die Aggressivität eines Wassers angesehen. Das

ist aber nicht der Fall. Eine Anzahl anderer Faktoren sind nach den neuesten wissenschaftlichen Erkenntnissen ebenfalls von Einfluß.

Da die Korrosion durch Verwendung korrosionsfesten Materials am leichtesten zu vermeiden ist, sollen auf die z.T. recht komplizierten Vorgänge im Rahmen dieser Studie nicht näher eingegangen werden. Im übrigen sind z. Zt. mehrere DIN-Normen über Korrosion in Arbeit, denen nicht vorgegriffen werden soll.

Es sei deshalb zu diesem Problem nur festgestellt, daß sowohl chemische als auch elektrochemische Vorgänge, wie z.B. lokale Elementbildungen, eine Rolle spielen.

Bei Alterungserscheinungen anderer Art, die nicht durch Korrosion hervorgerufen sind, können die Brunnen meistens mittels einer richtig durchgeführten Regenerierung wieder auf ihre alte bzw. zumindest auf eine ausreichende Leistung gebracht werden. Falls beim Brunnenbau aber falsches, korrosionsanfälliges Material verwendet wird, muß ein Brunnen aufgrund der Folgeerscheinungen - genau wie bei einer falschen Wahl der Kiesschüttung - in den meisten Fällen total aufgegeben werden. Als Beispiel sind dem Verfasser Brunnen in Erinnerung, die in Pakistan in großer Anzahl in aggressivem Grundwasser niedergebracht worden waren. Als Filterrohre dienten völlig ungeschützte Stahlrohre, in die an Ort und Stelle Schlitze eingeschnitten wurden. Nach relativ kurzer Zeit ließen die Brunnen in ihrer Leistung erheblich nach. Als Ursache vermutete man zunächst eine Verstopfung der Filterrohrschlitze durch Ablagerungen aus dem Wasser. Es stellte sich dann aber heraus, daß die Schlitze infolge Korrosion fast völlig zugewachsen waren. Die Korrosionsprodukte haben ja bekanntlich ein 10-15 faches Volumen ihres Ausgangsmaterials. Eine Abhilfe war nicht möglich. Die Brunnen mußten durch neue ersetzt werden.

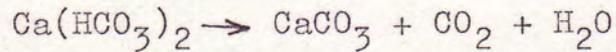
Von Ausnahmen abgesehen - darunter fallen z.B. kurzlebige Brunnen (Grundwasserabsenkungsmaßnahmen) - sollte deshalb im Brunnenbau ausschließlich korrosionsfestes Material verwendet werden. Auch inertolgetauchte und verzinkte Rohre sind in diesem Sinne nicht korrosionsfest.

2.3. V e r s i n t e r u n g

Unter V e r s i n t e r u n g versteht man im Brunnenbetrieb die Bildung von Carbonaten und deren Ablagerung in der Kiesschüttung und in den Filterrohrschlitzen. Die Carbonate sind im unbeeinflussten Grundwasserstrom zunächst noch als Bicarbonate gelöst vorhanden, sofern das Wasser überschüssige Kohlensäure enthält oder zumindest noch im Kalkkohlendioxidgleichgewicht ist. Diese Voraussetzungen sind bei kalkhaltigen Grundwässern immer, zumindest fast immer gegeben, da die Carbonate sonst auch dann schon im Untergrund ausfallen und zu Verstopfungen führen müßten, wenn keine Brunnen betrieben würden. Der Untergrund wüchse also auch bei unbeeinflusstem Grundwasserstrom mit der Zeit zu und von Jahrtausenden oder Jahrmillionen wäre eine Grundwasserbewegung im Untergrund nicht mehr möglich.

Das Kalkkohlendioxidgleichgewicht wird unterschritten, wenn außer der überschüssigen Kohlensäure auch noch ein Teil der zugehörigen aus dem Grundwasser entweicht. Die noch verbliebene Kohlensäure reicht dann nicht mehr aus, um die Bicarbonate weiterhin restlos in Lösung zu halten. Letztere fallen teilweise als unlösliche Carbonate aus und führen zu den genannten Inkrustationen in der Kiesschüttung bzw. in den Filterrohrschlitzen. Gase, wie z.B. die Kohlensäure, entweichen dann, wenn das Wasser druckentlastet wird, weil die Lösungsfähigkeit von Gasen in Flüssigkeiten vom Druck abhängig ist. Eine Druckentlastung tritt in jedem Brunnen ein, da er eine mehr oder weniger große Absenkung des Grundwasserspiegels für seinen Betrieb benötigt.

Der chemische Vorgang der Versinterung kann vereinfachend wie folgt dargestellt werden:



Früher war man der Auffassung, daß die Brunnenalterung vor allem eine Versinterung sei, also auf einer Entgasung beruhe (35) (55). Selbst die Verockerung (siehe Abschnitt 2.4) führte man hauptsächlich darauf zurück, weil die Entgasung einen Anstieg des pH zur Folge hat. Dies wiederum kann zu einer Verschiebung der Gleichgewichtskonzentrationen des pH-abhängigen Löslichkeitsproduktes des Eisen-III-Hydroxides und verschiedener Eisen-III-Oxidhydrate und damit zur Ausfällung dieser Stoffe führen.

Diese Auffassung kann nicht mehr aufrecht erhalten werden. Bei Untersuchungen, die in Brunnen der verschiedensten Grundwassergewinnungsgebiete über viele Jahre hinweg durchgeführt worden sind, wurde eindeutig festgestellt, daß die Inkrustationen in Brunnen nur zu einem verschwindend geringen Anteil aus Carbonaten bestehen. Auch die in der genannten Form chemisch abgeschiedenen Eisen-III-Oxidhydrate konnten zwar in vielen Brunnen, aber jeweils nur vereinzelt angetroffen werden.

Chemische Analysen der Inkrustierungen aus einer großen Anzahl Berliner Brunnen ergaben z.B. einheitlich folgende Zusammensetzung:

Fe (berechnet als Fe_2O_3)	i.M.	72 %
CaO		1,6 - 3,5 %
MgO		2 %
Glühverlust		5 %
SiO_2		5 %

Die Härtebildner sind also nur mit verschwindend geringen Mengen vertreten. Das bedeutet, daß die Alterung von Brunnen nur in geringem Umfang auf eine Versinterung zu-

rückzuführen ist. Die Behauptung, eine Brunnenalterung sei vor allem eine Versinterung, dürfte damit keine Allgemeingültigkeit besitzen. Ausnahmen kommen natürlich auch hier vor.

Der Grund hierfür liegt darin, daß die Entgasung bei den Wasserspiegelabsenkungen, die im Brunnenbetrieb allgemein üblich sind, nicht groß genug ist, um eine nennenswerte Kalkabscheidung einleiten zu können. Prof. Naumann hat dies in einem Vortrag auf einer Brunnenbauertagung in Berlin anhand eines Zahlenbeispiels nachgewiesen (41). Außerdem verläuft die chemische Reaktion bei der Versinterung relativ langsam, so daß die Durchflußzeit, die das Grundwasser für die Passage der Kiesschüttung und der Filterrohrschlitze benötigt, in den überwiegenden Fällen für derartige Inkrustationen nicht ausreicht, zumal die Absenkung des Grundwasserspiegels, die eine nennenswerte Entgasung hervorrufen könnte, hauptsächlich erst in unmittelbarer Brunnennähe erfolgt.

Als weiteres Argument gegen die Überbewertung der Versinterung für die Brunnenalterung können noch Berliner Untersuchungen herangezogen werden, die in Heberleitungen durchgeführt worden sind. Letztere werden bekanntlich als Vakuumleitungen betrieben, in denen wegen der Unterdruckverhältnisse die Entgasung des Wassers besonders hoch sein müßte. Die Luft, die aus diesen Rohrleitungen ständig oder in Abständen abgesaugt wird, müßte also einen deutlich erhöhten Anteil an CO_2 enthalten. Das war aber niemals der Fall.

2.4. Verockerung

Mit Verockerung bezeichnet man im Brunnenbetrieb die Anlagerung von unlöslichen Eisen- und Manganverbindungen, die im unbeeinflussten Grundwasser zunächst noch gelöst enthalten sind und die in Brunnennähe bzw. im Brunnen selbst infolge physikalischer, chemischer oder biologischer Vorgänge als unlösliche Verbindungen ausfallen. Es

handelt sich dabei vor allem um Hydroxide und Oxidhydrate.

Eine Verockerung kann also nur entstehen, wenn Eisen- und/oder Manganionen im Wasser vorhanden sind, sei es, daß sie auf natürliche Weise vom Grundwasserstrom aus dem durchflossenen Gestein aufgenommen oder durch sogenannte Eisenlieferanten, z.B. vom Brunnenrohrmaterial, an das Wasser abgegeben worden sind. Sauerstoffhaltige Wässer sind normalerweise eisen- und manganfrei. Wenn dies nicht der Fall wäre, würden das lösliche Fe^{2+} und Mn^{2+} in unlösliches Fe^{3+} und Mn^{4+} durch reine Oxidation übergeführt und somit bereits im natürlichen Grundwasserstrom die durchflossenen Poren des Untergrundes verstopfen.

Die Verockerung kann a l l e Teile eines Brunnens, insbesondere die Filterrohrschlitze, die Poren der Kiesschüttung sowie die Einlauföffnungen von Unterwasserpumpen befallen.

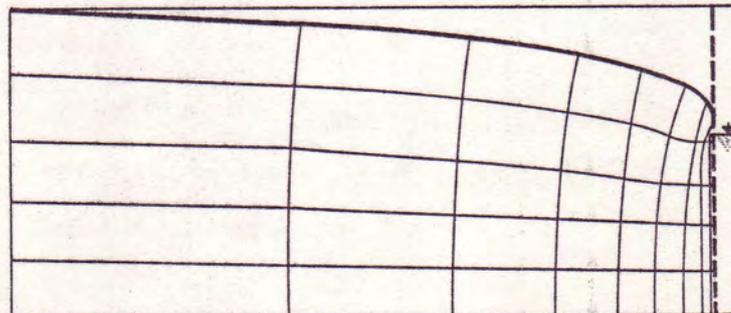
2.4.1 C h e m i s c h e V e r o c k e r u n g o h n e S a u e r s t o f f z u f u h r

2.4.11 Das im Grundwasser gelöste Eisen liegt überwiegend in seiner gut löslichen zweiwertigen Form vor. Ein geringer Anteil ist meist jedoch dreiwertig. Er besteht aus Eisen-III-Hydroxid und Eisen-III-Oxidhydraten. Deren Löslichkeit ist pH-abhängig. Die Analysen des Grundwassers weisen in den verschiedenen Tiefen eines Brunnens oft große Abweichungen auf. Dadurch kann es z.B. bei der Mischung dieser verschiedenartigen Wässer am bzw. im Brunnen zu einer Verschiebung der Gleichgewichtskonzentration und damit zu Ausfällungen dieser Stoffe kommen. Ausgelöst werden kann dieser Vorgang in einigen Fällen - wie bereits in Abschnitt 2.3. angegeben - durch eine Teilentgasung des CO_2 . Das hat einen Anstieg des pH und möglicherweise die erwähnte Verschiebung der Gleichgewichtskonzentration zur Folge. Beide Vorgänge - Mischung und Entgasung - spielen jedoch bei der Verockerung im allgemeinen nur eine untergeordnete Rolle (20) (53).

2.4.12 Nach Hässelbarth und Lüdemann müssen chemisch gebildete Ablagerungen von Eisen-III-Hydroxiden und Eisen-III-Oxidhydraten nicht immer die Folge einer massiven Störung des Gleichgewichtes im Sinne Abschnitt 2.4.11 sein (20). Es kann vielmehr nicht ausgeschlossen werden, daß die Löslichkeit für Eisen-III-Hydroxide im strömenden Grundwasser zeitweise überschritten wird. Dabei bilden sich durch Zusammentritt mehrerer Moleküle des Hydroxides und intramolekularen Wasseraustritts Kristallkeime, die sich auf günstiger Unterlage, besonders auf Eisenoxidhydratablagerungen als Kristallbausteine anlagern. Mikroskopisch kleine Kristalle dieser Art können in Brunnen in verschiedenen Tiefen gefunden werden. Da die Wahrscheinlichkeit der Anlagerung mit der Strömungsgeschwindigkeit wächst, läßt sich die bevorzugte Anlagerung in der Kiesschüttung und in den Filterrohrschlitzen der Brunnen erklären. Versuche, derartige Kristallkeime im Brunnenwasser nachzuweisen und ihre Konzentration zu bestimmen, sind jedoch erfolglos geblieben.

2.4.2 Chemische Verockerung infolge direkter Sauerstoffzufuhr

2.4.21 Das sauerstofffreie Grundwasser fließt - wie im Bild 8 dargestellt - auf einen Brunnen zu. Falls es eine freie



Anströmung eines vollkommenen Brunnens (nach Nahrgang)

Falls es eine freie Oberfläche hat, vermag es, im Bereich des Kapillarsaumes und der Oberfläche Sauerstoff aus der Bodenluft aufzunehmen und diesen durch Diffusion bis zu einer gewissen Tiefe, über die keine Angaben gemacht werden können, an die darunter liegenden Stromfäden weiterzugeben. Der Sauerstoff oxidiert im Bereich der Grundwasser Oberfläche das 2-wertige gelöste Eisen zum 3-wertigen unlöslichen bzw. das 2-wertige lösliche Mangan zum 4-wertigen unlöslichen. Dieser Vorgang spielt sich auch im unbeeinflussten natürlichen Grundwasserstrom ab. Die Folge sind Ablagerungen von Brauneisenstein, dem sogenannten Ortsstein. Im Erdreich ist er gut an der Braunfärbung zu erkennen, die den Bereich kennzeichnet, in dem sich das Grundwasser jahreszeitlich bedingt auf- und abbewegt. Die Ortssteinbildung ist also eine Verockerungserscheinung. Die abgelagerten Mengen sind jedoch sehr klein. Eine Störung des Grundwasserstromes tritt dadurch nicht ein.

Dicht vor und am Brunnen drängen sich die Stromfäden infolge der Absenkung besonders im oberen Bereich stark zusammen. Dabei kommt es zu einer Vermischung der tieferen sauerstofffreien, mit gelöstem 2-wertigen Eisen behafteten Stromfäden und der oberflächennahen Stromfäden, die Sauerstoff aus der Bodenluft aufgenommen haben. Die Folge ist eine Verockerung im Mischungsbereich. Bei einem neuen Vertikalbrunnen, der auch in Höhe des Wasserspiegels noch mit Filterrohren ausgerüstet ist, werden sich die Inkrustationen zunächst nur auf einen kleinen Abschnitt des Filterrohres beschränken. Werden die Ablagerungen aufgrund eines hohen Eisen- und Mangangehaltes sehr groß, wachsen die im Bereich des abgesenkten Grundwasserspiegels liegenden Filterrohrschlitze immer mehr zu, bis an dieser Stelle kein Wasser mehr in den Brunnen einfließen kann. Die durch eine Verockerung gefährdete Zone verlagert sich zwangsläufig in den Bereich darunter. Mit der Zeit kann durch ständige Wiederholung ein beträchtlicher Teil des Filterrohres vom Wasserspiegel aus in die Tiefe zuwachsen.

Man legt deshalb die Filterrohroberkante - wenn möglich - so tief, daß sie auch bei größter Absenkung niemals in den Bereich des Wasserspiegels zu liegen kommt. Dadurch wird zwar die Verockerung nicht ausgeschaltet, weil die Mischung der verschiedenen Stromfäden nicht verhindert werden kann, die Inkrustation der Filterrohrschlitze zögert man damit aber hinaus, da sich die Verockerungsvorgänge zunächst im Untergrund über der Filterrohroberkante abspielen. Völlig vom Filterrohr fernzuhalten vermag man sie meist aber auch dadurch nicht. Es sei denn, die Filterrohroberkante läge sehr tief unter dem Wasserspiegel. Bild 9 zeigt eine derartige Verockerung. Vorn ist das schlitzlose Aufsatzrohr, im Hintergrund die Filterrohroberkante mit dem verockerten Streifen zu erkennen. Dahinter ist das Filterrohr völlig sauber.



Bild 9

Es wird oft die Meinung vertreten, daß die Sauerstoffaufnahme aus der Bodenluft bei einer intermittierenden Betriebsweise eines Brunnens stark begünstigt wird. Begründet wird dies mit dem dauernden Pendeln des Grund-

wasserspiegels im Absenkungstrichter, in den bei jeder Inbetriebnahme eines Brunnens die Bodenluft einströmt. Dabei soll es zu einer besonders intensiven Mischung des Grundwassers mit der Bodenluft kommen. Diese Befürchtung ist m.E. übertrieben; denn sie ist nur berechtigt für einen sehr kleinen Bereich in unmittelbarer Brunnennähe, weil nur dort das Grundwasser relativ schnell ansteigen kann, ohne daß die Bodenluft rechtzeitig entweicht. Der übrige Absenkungsbereich füllt sich nur langsam auf. Dort kann die Bodenluft schnell genug vor dem Wasser nach oben steigen.

Bei Brunnen im gespannten Grundwasser wäre rein theoretisch eine Sauerstoffaufnahme in die oberen Stromfäden aus der Bodenluft denkbar, wenn die Deckschicht zwar wasser dicht, aber trotzdem luftdurchlässig ist und die Deckschicht nicht von Wasser überlagert wird.

2.4.22 Bei V e r t i k a l b r u n n e n spielt die Verockerung, die durch eine Sauerstoffaufnahme aus der Bodenluft bedingt ist, keine große Rolle, da sie sich nur in einem sehr kleinen Bereich des Filterrohres abspielt. Ein größerer Filterrohrbereich ist dagegen beim H o r i z o n t a l b r u n n e n gefährdet. Der Vollständigkeit halber sei deshalb der gleiche Verockerungsvorgang an einem Strömungsbild eines Horizontalbrunnens erläutert.

Im Bild 10 ist dargestellt, wie das Grundwasser einen Horizontalfilterstrang anströmt. Also wird die

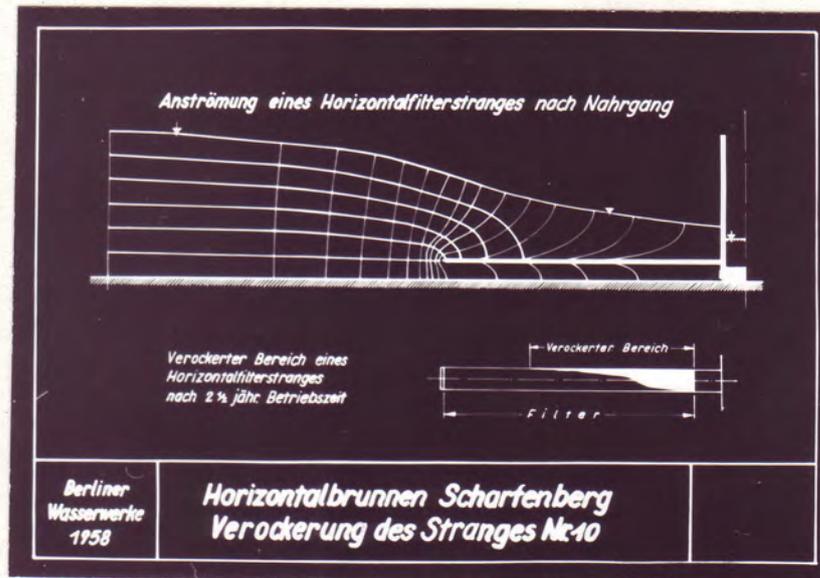


Bild 10

Hier wird die obere Anströmungszone, in die unmittelbar oder durch Diffusion mittelbar Sauerstoff aus der Bodenuft eindringen konnte, zum Filterrohr hin nicht wie beim Vertikalbrunnen immer schmäler, sondern erheblich breiter. Der Filterrohrbereich, in den das oberflächennahe und deshalb am ehesten mit Sauerstoff behaftete Grundwasser einströmt und der deshalb durch eine chemische Verockerung gefährdet ist, ist aus diesem Grunde beim Horizontalbrunnen sehr viel größer als beim Vertikalbrunnen. Er umfaßt am Beispiel des Bildes 9 rd. $\frac{2}{3}$ der gesamten Filterrohrstrecke, wenn man einmal annimmt, daß der Bereich zwischen den beiden oberen Stromlinien Sauerstoff aufnehmen kann. Falls also 2-wertiges Eisen und Mangan im Grundwasser gelöst enthalten ist, dann kann dieser Filterrohrbereich verockern. Im Bild ist unter dem Strömungsverlauf der in einem Berliner Horizontalbrunnen tatsächlich angetroffene, inkrustierte Bereich, wie er mit einer Unterwasserkamera festgestellt werden konnte, dargestellt. Die Bilder 11 - 15 zeigen fotografische Aufnahmen eines Horizontalstranges

in verschiedenen Abständen vom Brunnenschacht aus. Die Intensität der Ablagerungen nimmt zur Strangspitze hin ab.

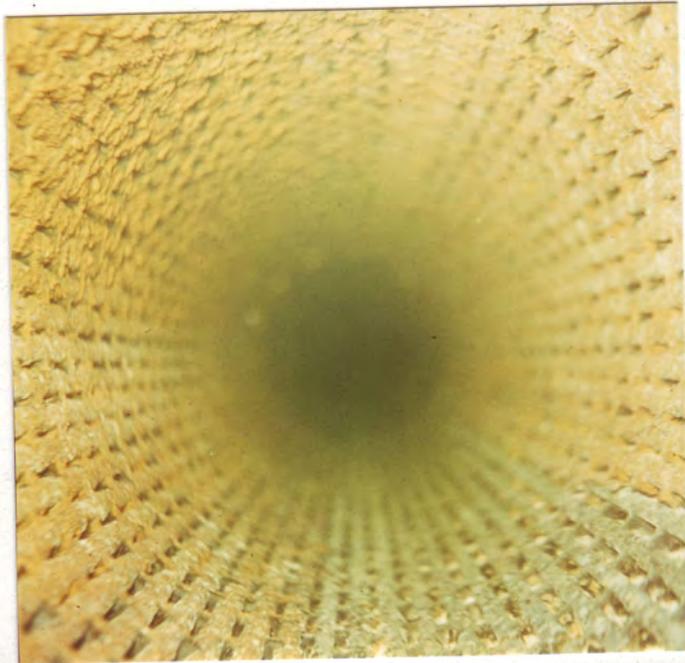


Bild 11

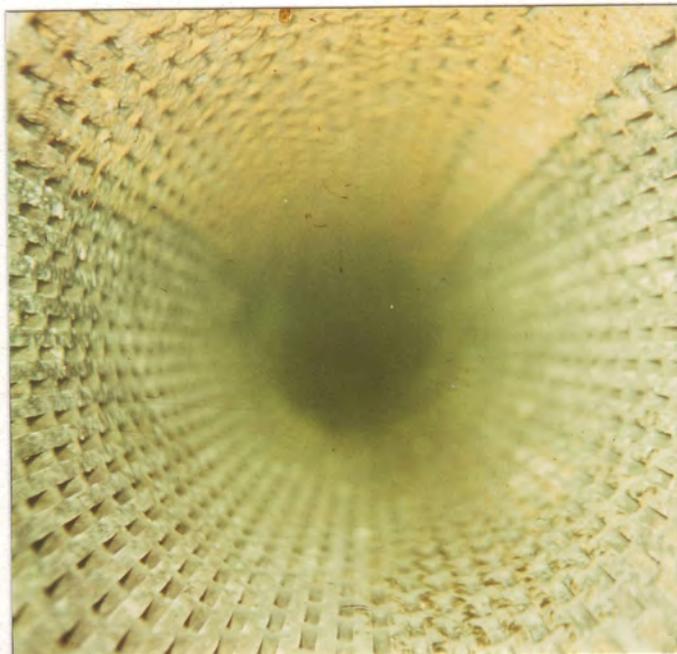


Bild 12

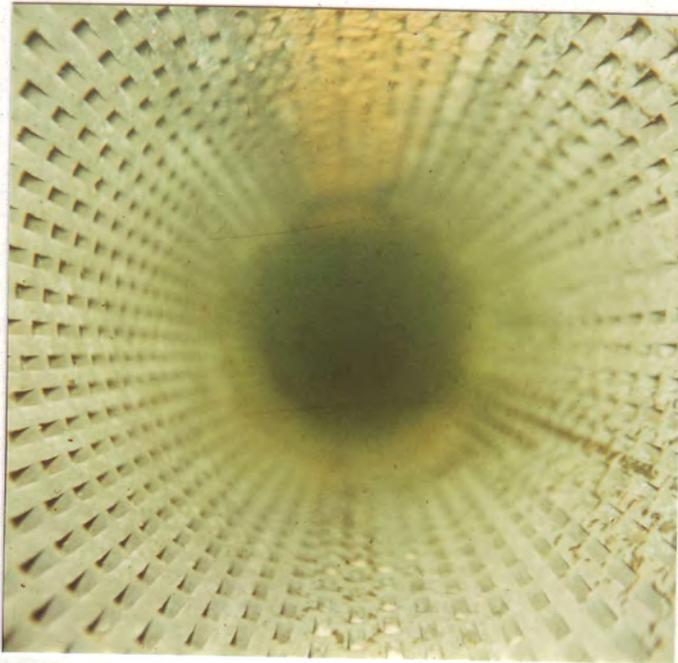


Bild 13

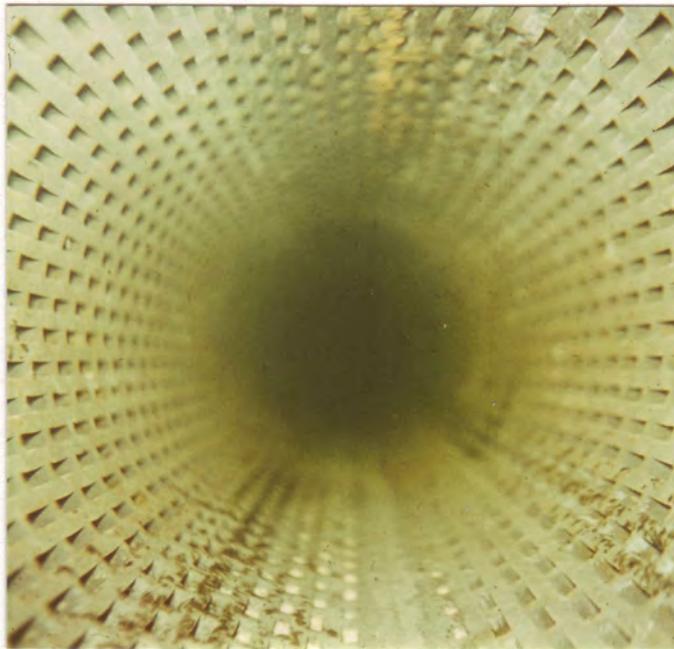


Bild 14

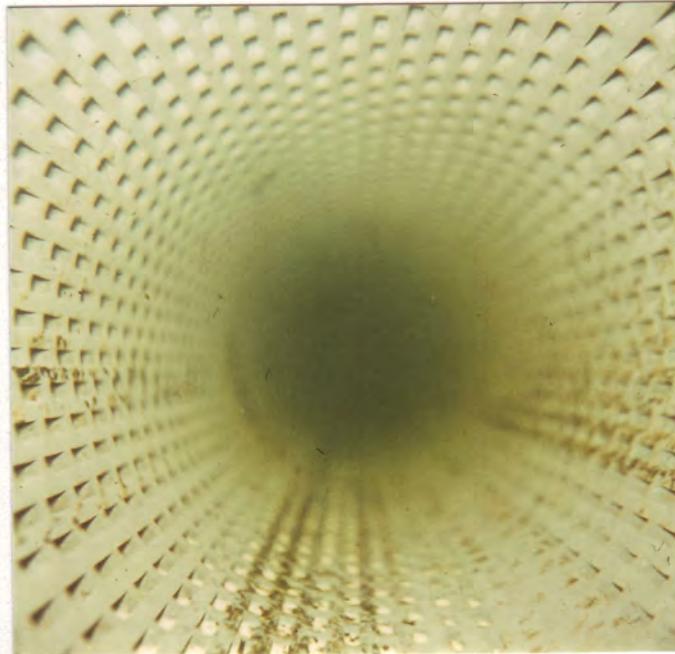


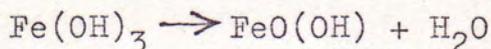
Bild 15

Daß sich die chemische Verockerung bei einem Horizontalbrunnen viel stärker als bei einem Vertikalbrunnen auswirken kann, ist allein durch seine andere Anströmung gegeben. Ein Vergleich des Strömungsbildes mit dem Alterungsfortschritt läßt eindeutig den Zusammenhang zwischen der Verockerungsintensität und dem Abstand der Stromlinien von der Grundwasseroberfläche erkennen. Stimmen, die früher recht laut behauptet haben, Horizontalbrunnen könnten wegen der Lage ihrer Filterrohre niemals verockern, verstummen nach diesen Feststellungen recht bald (15).

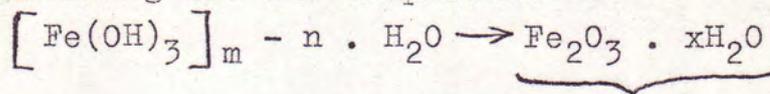
2.4.23 Vereinfachend ist der Vorgang der chemischen Verockerung folgender:

Das 2-wertige Eisen ist im Wasser entweder als Ion oder - falls nicht - , dann meist als $\text{Fe}(\text{HCO}_3)_2$ gelöst vorhanden.

- 1) Oxidation: $\text{Fe}(\text{HCO}_3)_2 + 1/2 \text{O}_2 \rightarrow \text{Fe}(\text{OH})_3 + 2 \text{CO}_2$
- 2) Alterungsvorgang der Ablagerungen durch Abgabe von Hydratwasser:

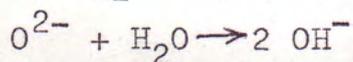
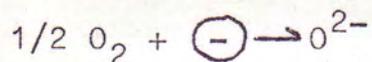
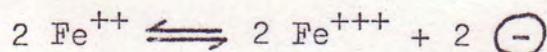


- 3) Alterung bis zum Endprodukt



(Fe_2O_3 = Brauneisenstein)

Gelöste zweiwertige Eisenionen werden zu unlöslichen dreiwertigen oxidiert.



Die entstandenen Fe^{+++} -Ionen reagieren mit den bei der Oxidation gebildeten OH^- -Ionen und den OH^- -Ionen des Wassers zu $\text{Fe}(\text{OH})_3$.

2.4.3 Chemische Verockerung infolge indirekter Sauerstoffzufuhr

Der Vollständigkeit halber sei hier die Möglichkeit einer chemischen Verockerung infolge indirekter Zufuhr von Sauerstoff erwähnt. Hierbei wird der für eine Oxidation erforderliche Sauerstoff nicht wie lt. Abschnitt 2.4.2 unmittelbar als atomarer Sauerstoff, z.B. aus der Bodenluft, in das Grundwasser eingetragen, sondern er wird im Grundwasser selbst durch biogene Vorgänge erzeugt. Zu nennen sind insbesondere denitrifizierende und desulfurierende Bakterien. Sowohl über die Vorgänge an sich als auch über ihren Umfang - falls überhaupt - besteht zur Zeit noch keine eindeutige Klarheit.

2.4.4 P h y s i k a l i s c h b e g ü n s t i g t e V e r - o c k e r u n g

2.4.41 Eine Theorie, deren Ursprung nicht mehr genau festzustellen ist, die aber wahrscheinlich auf Untersuchungen an Enteisungsfiltern beruht, besagt, daß die Strömungsart auf das Ausfällen von Eisen- und Manganverbindungen von Einfluß ist (58). So soll eine Turbulenz die Ablagerung dieser Stoffe, die vorher im Grundwasser als gelöste 2-wertige Verbindungen vorhanden waren, beschleunigen oder überhaupt erst ermöglichen. Die Strömungsart wäre also ein Katalysator, der die chemische Reaktion, die zur Verockerung führt, in Gang bringt oder beschleunigt. Entstanden ist diese Theorie wahrscheinlich deshalb, weil mit allen bisher besprochenen Verockerungsmöglichkeiten die in der Praxis vorkommende Brunnenalterung damals nicht zu erklären war. Die Theorie wurde deshalb wie ein Strohalm empfunden, an den sich viele geklammert haben. Selbst in neuester Literatur wird diese Auffassung noch vertreten (4). Vergessen wurde dabei nur, daß zu einer Umwandlung des 2-wertigen löslichen Eisens und Mangans zu ihren unlöslichen Verbindungen nun einmal Sauerstoff notwendig ist. Turbulenz allein genügt nicht, um Fe^{2+} in Fe^{3+} überzuführen. Das hat Moll in Laborversuchen gezeigt, indem er Fe^{2+} -haltiges Wasser stundenlang unter einer sauerstofffreien Stickstoffschicht turbulent rühren ließ (38). Es erfolgte, wie auch nicht anders zu erwarten war, keine Umwandlung. Erst nach Sauerstoffzugabe färbte sich die Lösung braun, d.h. es hatten sich erst dann unlösliche Eisenverbindungen gebildet. Und nur diese können zur Verockerung führen.

Fast alle eisenhaltigen Grundwässer enthalten aber meist keinen freien Sauerstoff oder höchstens Spuren davon. Die Verfechter der Turbulenztheorie erweiterten deshalb ihre Hypothese dahingehend, daß im Grundwasser möglicherweise freier Sauerstoff in geringen Spuren vorhanden sein könnte und daß dieser Sauerstoff wegen der Laminarität im natür-

lichen Grundwasserstrom neben den 2-wertigen Eisen- und Manganverbindungen bestehen könne, ohne oxidativ zu reagieren. Erst am bzw. im Brunnen tritt dann eine Reaktion ein, ausgelöst und beschleunigt durch die Turbulenz.

Das Kriterium für die Strömungsart ist die Reynold'sche Zahl Re . Für die Grundwasserströmung ist sie folgendermaßen definiert:

$$Re = \frac{v_f \cdot d}{\nu}$$

Darin bedeuten: v_f Filtergeschwindigkeit
 d Korndurchmesser
 ν Kinematische Zähigkeit

Zunächst muß festgestellt werden, daß es im Untergrund und auch noch in der Kiesschüttung zu einer turbulenten Strömung nur in Ausnahmefällen kommen wird; selbst in den Filterrohrschlitzen wird wahrscheinlich meistens noch keine Vollturbulenz herrschen. Sie beginnt nämlich erst dann, wenn die Filtergeschwindigkeit v_f so groß wird, daß die Reynold'sche Zahl den Wert 300 übersteigt. Die Strömung liegt also höchstens im teilturbulenten Bereich und auch dort nur an der untersten Grenze.

2.4.42 Die Theorieverfechter schlagen nun vor, Brunnen in Zukunft so zu dimensionieren, daß die Filterrohre nur laminar angeströmt werden. Es wurden Berechnungsbeispiele gebracht, bei denen zulässige Brunnenleistungen herauskamen, die sehr klein und deshalb für die Praxis einfach nicht akzeptabel sind (55). Dabei waren die errechneten Werte noch viel zu günstig, weil als Laminaritätsgrenze $Re = 10$ nach Kling eingesetzt worden war. Dieser Wert ist aber nur gültig für kugeliges Material; in Kiesschüttungen, deren Kornform sehr unregelmäßig ist, wird die Laminarität jedoch schon bei kleineren Reynold'schen Zahlen ver-

lassen. Es ergäbe sich also eine noch viel kleinere zulässige Brunnenleistung.

Bei der Berechnung der zulässigen Brunnenleistung wurde nicht nur der Fehler eines falschen Ansatzes der Reynold'schen Zahl gemacht, sondern auch so gerechnet, als ob das Filterrohr in allen Tiefen gleichmäßig angeströmt wird. Wenn man schon glaubt, die Turbulenztheorie bei der Brunnenbemessung anwenden zu müssen, dann sollte man sie auch konsequent durchführen und in der Berechnung die unterschiedliche Beaufschlagung des Filterrohres berücksichtigen. Man muß so rechnen, daß die Laminarität über die gesamte Filterstrecke - von außergewöhnlichen Spitzenbelastungen abgesehen - gewährleistet ist.

2.4.43 Der Verfasser hat schon im Jahre 1953 Flow-Messungen in Vertikalbrunnen durchgeführt und dabei in den verschiedenen Tiefen einen sehr unterschiedlichen Zufluß zum Brunnen festgestellt. Der Zufluß ist abhängig von der Durchlässigkeit der jeweils durchteuften Schichten, wie deutlich aus Bild 16 hervorgeht.

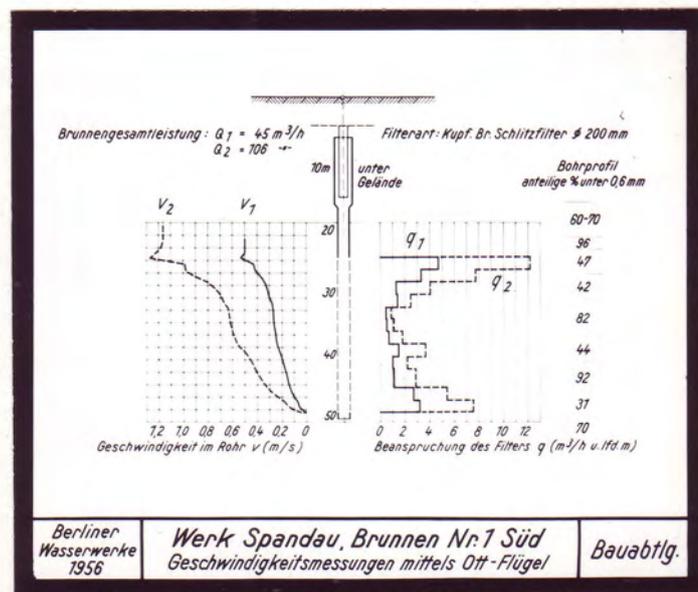


Bild 16

Das war eigentlich auch nicht anders zu erwarten. Die Demonstration dieser Zuflußverteilung aufgrund von Meßergebnissen war schon lange fällig, um die bis dahin in der Literatur leider immer wieder auftauchende Kurve der Zuflußverteilung zu widerlegen. Letztere ist in Bild 17 dargestellt und besagt, daß der Zufluß an der Filterrohr-oberkante am größten ist und zur Filterrohrunterkante hin geradlinig bis auf Null abnimmt.

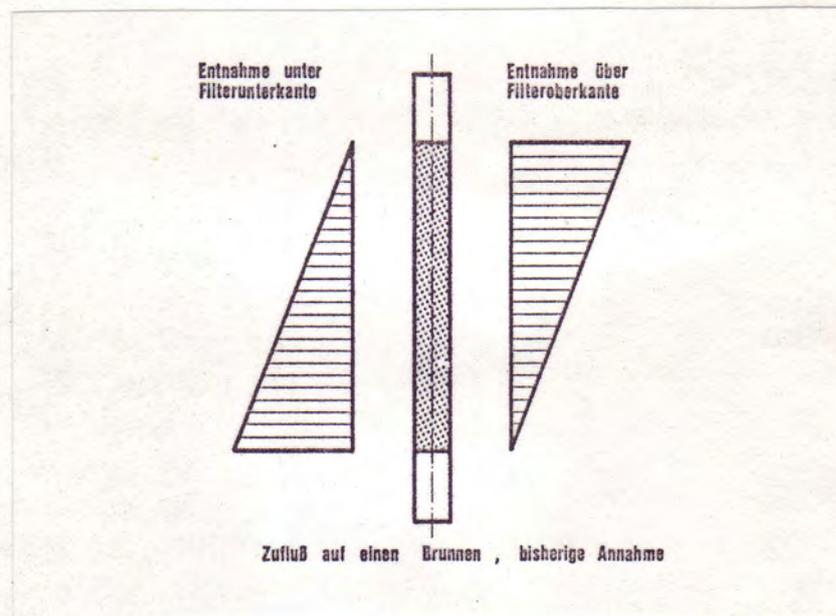


Bild 17

Die rechte Kurve gilt nur für eine Entnahmestelle über der Filterstrecke und für den Fall, daß sich die Reibungsverluste im Brunnenfilterrohr durch einen sich ständig ändernden Durchmesser so gestalten, daß die effektiv wirksame Absenkung in der jeweiligen Tiefe zu dem dargestellten Zufluß führt. Die Kurve besagt nämlich, daß am unteren Ende des Brunnens die wirksame Absenkung, die oben im Brunnen gemessen wird, durch die Reibungsverluste bis auf Null aufgezehrt worden ist. Die genannten Voraussetzungen sind aber niemals gegeben, so daß die Kurve völlig unrealistisch ist. Man sollte sie deshalb in Zukunft in der Literatur nicht mehr bringen.

Der Verfasser hat übrigens vor etwa 10 Jahren in einem Vertikalbrunnen Druckmessungen in verschiedenen Tiefen vorgenommen und dabei die Reibungsverluste durch die Rohrströmung festgestellt. Es handelte sich um einen neuen, ca. 75 m tiefen Brunnen, der mit Brückenschlitzfilterrohren NW 200 mm ausgerüstet war. Die Brunnenleistung betrug $150 \text{ m}^3/\text{h}$, die Filterstrecke war ca. 35 m lang und in 3 Abschnitte aufgeteilt. Die Messungen, die noch nicht veröffentlicht worden sind, ergaben einen Druckverlust bzw. eine Abnahme der wirksamen Absenkung bis zur Filterrohrunterkante in 75 m Tiefe um rd. 20 %.

2.4.44 Anhand eines Beispieles soll die Auswirkung der Turbulenztheorie auf die Bestimmung der zulässigen Brunnenleistung erläutert werden. Es soll ausgegangen werden von dem heute noch geläufigen Brunnenaufnahmevermögen, das im Betrieb nur zu 50 % ausgelastet werden soll. Daraus ergibt sich eine ideale zulässige Brunnenleistung von $Q = D \cdot \pi \cdot h \cdot \delta_w / 280$, worin D den Bohrdurchmesser, h die Filterrohrlänge und δ_w den wirksamen Korndurchmesser des Grundwasserleiters bedeuten. Diese Gleichung ist in Bild 18 für verschiedene Bohrdurchmesser graphisch aufgetragen.

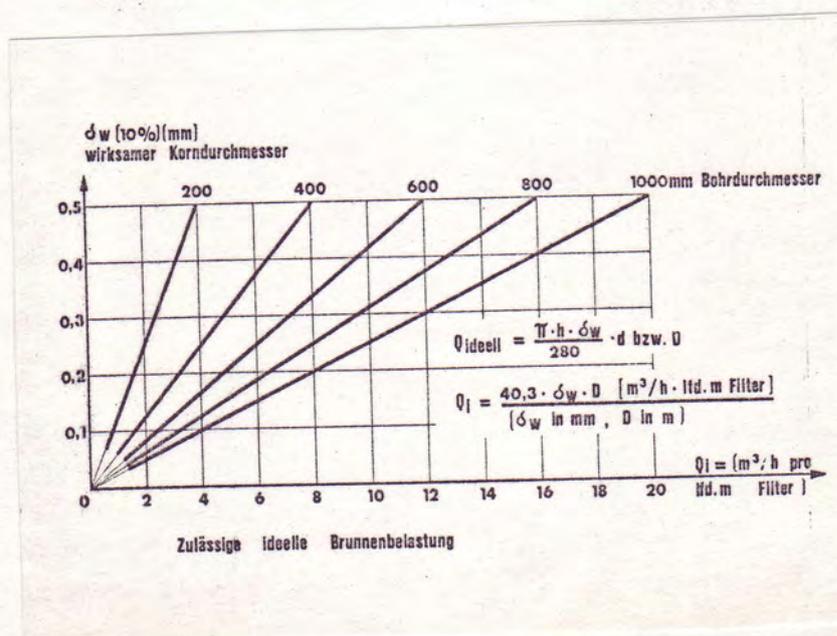


Bild 18

Bei einem heute in Lockergesteinen sehr gebräuchlichen, weil zweckmäßigen Bohrdurchmesser von 800 mm und einem für Mittel- bis Grobsand wirksamen Korndurchmesser von 0,2 mm ergibt sich daraus eine zulässige Leistung von $6,5 \text{ m}^3/\text{h}$ pro lfdm Filterrohr. Bei 12 m Filterstrecke dürfte ein solcher Brunnen auf die Dauer mit einer Gesamtleistung von $Q = 78 \text{ m}^3/\text{h}$ belastet werden. Dafür würde ein Filterrohrdurchmesser $d = 200 \text{ mm}$ ausreichen; denn die maximale Geschwindigkeit im Brunnenrohr käme nur auf $0,7 \text{ m/s}$ und das auch nur im oberen Filterrohrbereich (Bild 19).

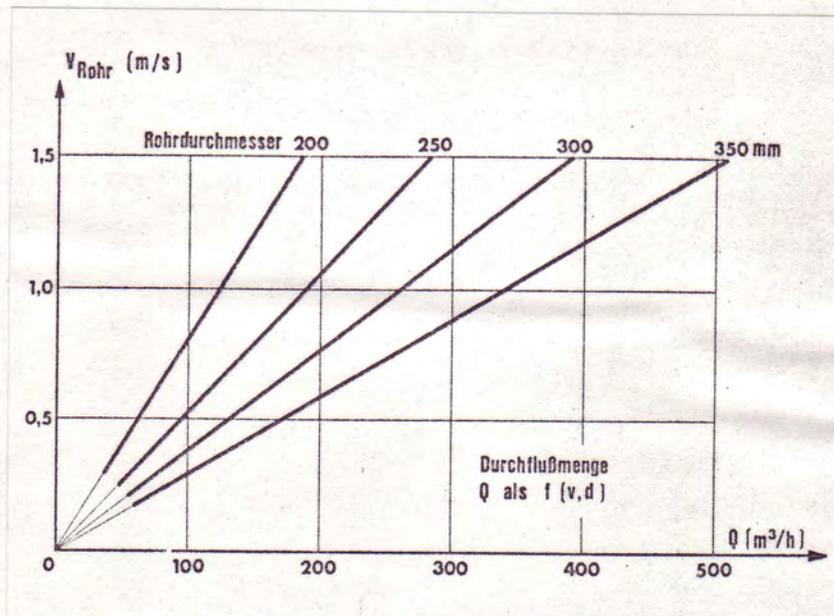


Bild 19

Wenn der gleiche Brunnen im Hinblick auf die Turbulenztheorie auf seine zulässige Belastung hin untersucht wird, dann muß die Strömung in der inneren Kiesschüttung am Außenmantel des Filterrohres an allen Stellen im laminaren Bereich verbleiben.

Die Kurven des Bildes 20 stellen die zulässige Entnahmemenge pro lfdm Filterrohr bei Einhaltung der laminaren Strömungsgrenze dar, und zwar in Abhängigkeit von der Filtergeschwindigkeit v_f , dem äußeren Filterrohrdurchmesser und dem mittleren Korndurchmesser der inneren Kessschüttung.

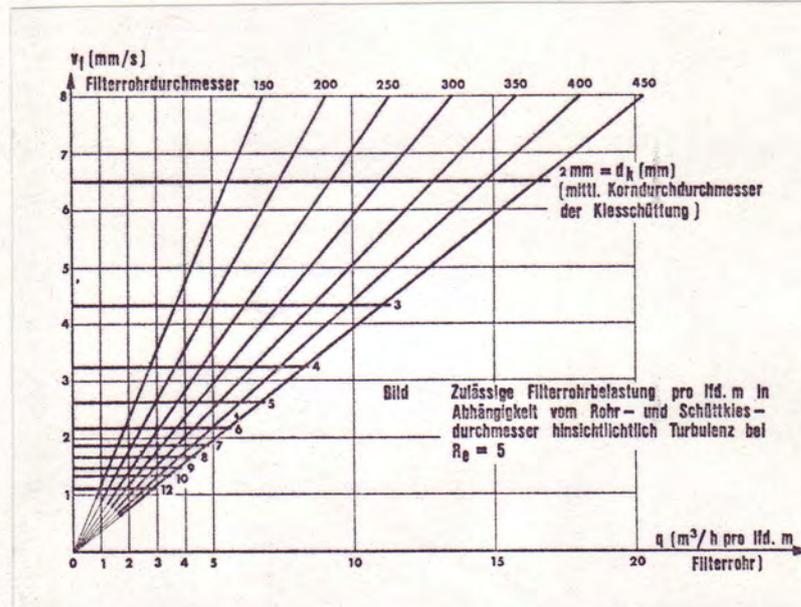


Bild 20

Der Brunnen würde mit einer 2-fachen Schüttung ausgerüstet, deren äußeres Korn mindestens 2-3 mm und deren inneres etwa 10 - 15 mm beträgt. Da die laminare Grenze in Schüttkiesen bei $Re = 5$ liegt, ergibt sich für ein mittleres Korn von $d_k = 12,5$ mm am Filterrohr eine zulässige Leistung von nur $1,2 \text{ m}^3/\text{h}$ pro lfdm Filterrohr. Das sind noch nicht einmal 20 % der Leistung, die nach dem Fassungsvermögen zulässig wäre. Der Brunnen dürfte selbst mit dieser Leistung nicht beansprucht werden; denn sie verringert sich weiter, wenn - wie konsequenterweise erforderlich - der mit der Tiefe variierende Zufluß berücksichtigt wird. Von lokalen Spitzenwerten abgesehen, müßte man z.B. im Berliner Raum mindestens den doppelten Wert der mittleren Beaufschlagung pro lfdm Filterrohr ansetzen,

der sich aus der Brunnenleistung und der Filterrohrlänge ergibt. Dadurch wird die zulässige Leistung nochmals um die Hälfte kleiner.

Die Folge einer solchen Brunnendimensionierung wäre eine 10mal so große Brunnenanzahl, um die gleiche Entnahmemenge zu erreichen. Dies wäre eine für die Praxis völlig indiskutabele Lösung, auch dann, wenn der Filterrohrdurchmesser auf NW 400 mm verdoppelt würde, weil dann immer noch 5mal so viele Brunnen erforderlich wären.

Die Turbulenztheorie spielt jedoch glücklicherweise für die Verockerung keine große Rolle, so daß bei der Brunnendimensionierung darauf keine Rücksicht genommen zu werden braucht. Eine große Anzahl von Berliner Brunnen wurden auf den Zusammenhang zwischen Verockerung und Laminarität der Brunnenanströmung hin untersucht. Es ergab sich dabei keine Abhängigkeit. Brunnen, bei denen die mittlere Reynold'sche Zahl bei über 30, also weit über der Laminaritätsgrenze lag und deren Wasser mit Eisengehalten um 2 mg/l und pH 7,0 für eine schnelle Brunnenalterung geradezu prädestiniert zu sein schienen, wiesen selbst nach einer Betriebsdauer von fast 20 Jahren nicht die geringsten Spuren einer Verockerung auf.

Schneider, der auch der Meinung ist, daß die Eintrittsgeschwindigkeit des Wassers in einen Brunnen nicht die Ursache für eine Verockerung sein kann, hat am Beispiel von 23 Brunnen nachgewiesen, daß die Verockerung durch geringe Geschwindigkeiten nicht zu vermeiden ist (53). Allein der Zeitraum der Verockerung wäre dadurch zu beeinflussen, aber nicht der Vorgang selbst. Obwohl die maximalen Geschwindigkeiten nur bei $v = 0,6$ mm/s, die mittleren bei $v = 0,3$ mm/s lagen, traten starke Verockerungserscheinungen auf. Bei diesen Werten war lt. Bild 20 die Laminaritätsgrenze bestimmt nicht überschritten worden.

2.4.45 Auch die Verockerungsverteilung in einem Horizontalfilterstrang läßt auf die untergeordnete Rolle der Turbulenztheorie schließen. Denn wenn sie richtig wäre, dann müßte die Verockerung an der Strangspitze beginnen bzw. am größten sein, weil dort der spezifische Wasserzufluß zum Filterrohr und damit auch die Fließgeschwindigkeit am Außenmantel des Filterrohres und in den Filterrohrschlitzen am größten ist. Das haben Geschwindigkeitsmessungen im Filterrohr an verschiedenen Stellen zwischen Brunnenschacht und Strangspitze, die der Verfasser 1956/7 durchgeführt hat, ergeben. Das Ergebnis ist in Bild 21 dargestellt.

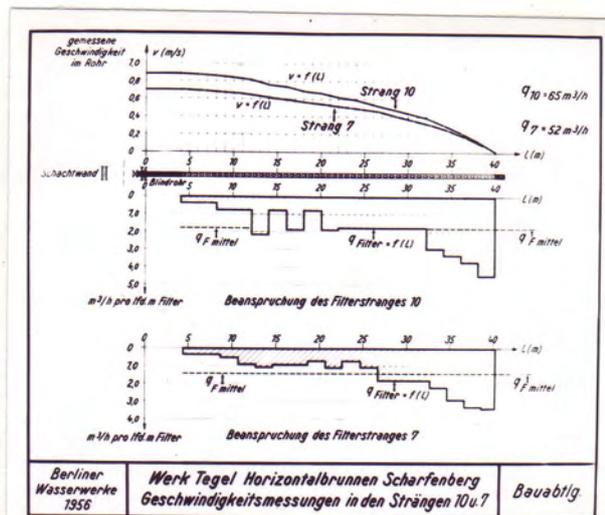


Bild 21

Die Zuflußgeschwindigkeit zum Filterrohr beträgt an der Strangspitze ein Vielfaches des Wertes in Schachtnähe. Das Verhältnis liegt zwischen 8:1 und 11:1. Trotzdem sind die Filterrohre - wie es die Turbulenztheorie eigentlich erwarten ließe - nicht an der Strangspitze verockert, sondern am stärksten in Schachtnähe, wie die Bilder 22-26 zeigen, obwohl dort die Anströmung bestimmt laminar ist.



Bild 22



Bild 23

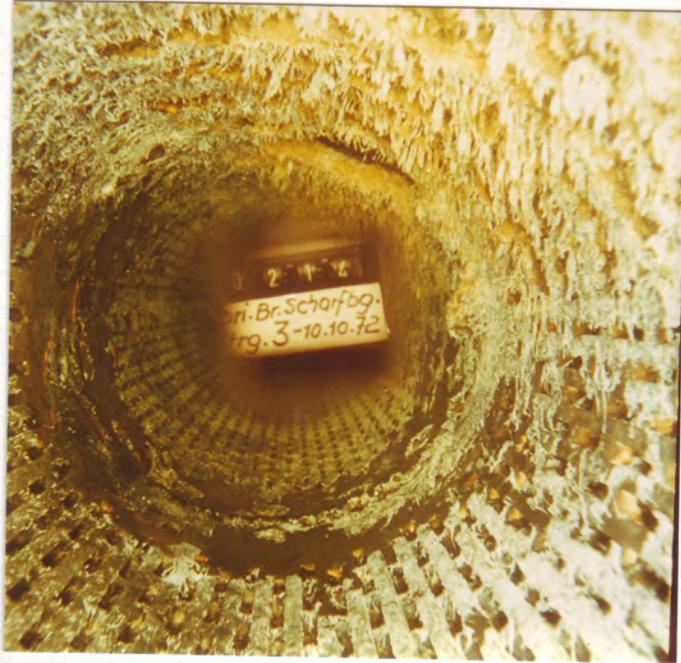


Bild 24

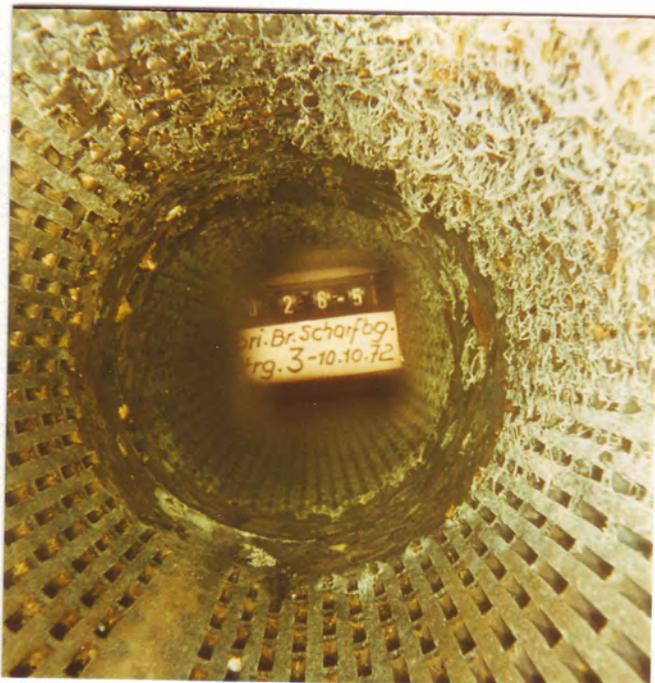


Bild 25

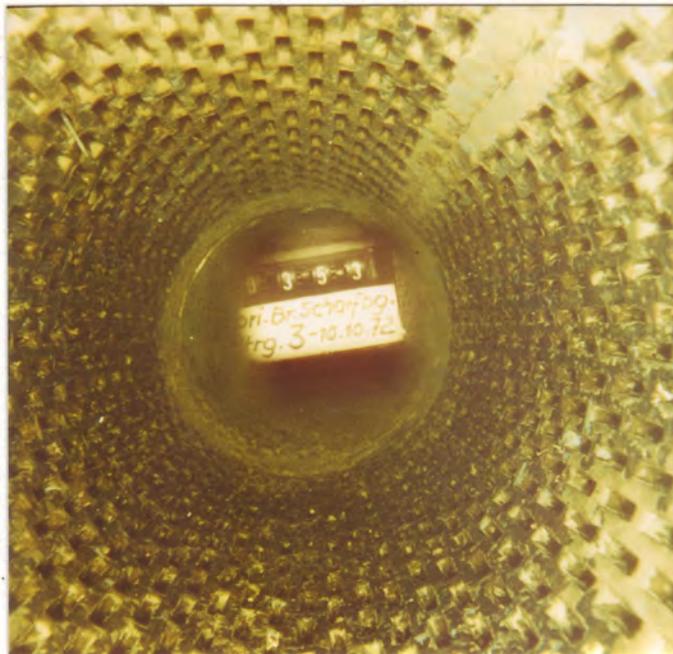


Bild 26

Die Spitze des kleinen Dreiecks auf den Bildern weist übrigens in Richtung des Filterrohrscheitels.

Die Verfechter des Horizontalbrunnens hatten als Hauptargument für ihre Behauptung, ein derartiger Brunnen würde nicht verockern, die wegen der großen Filterstrecken besonders geringen Eintrittsgeschwindigkeiten ins Feld geführt. Diese Argumente sind also auch hier - wie beim Vertikalbrunnen - widerlegt.

- 2.4.46 Abschließend zur Theorie einer physikalisch begünstigten Verockerung sei im Vorgriff auf Abschnitt 2.4.5 noch folgendes erwähnt. Um eine Strömung im laminaren Bereich zu halten, sind zwar relativ kleine Werte für v_f notwendig. Lt. Bild 20 können sie aber auch bei großen Filterrohrdurchmessern und großen Schüttkorndurchmessern zumindest noch bei $v_f = 1 \text{ mm/s}$ liegen. Demgegenüber haben Hässelbarth und Lüdemann festgestellt, daß die biologische Verockerung (2.4.5) schon beginnt, wenn die Filtergeschwindigkeit $0,1 \text{ m/h}$ oder $0,028 \text{ mm/s}$ übersteigt. Damit dürfte eine Diskussion über die Bemessung eines Brunnens hinsichtlich seiner laminaren Anströmung sehr in Frage zu stellen sein.

2.4.5 B i o l o g i s c h e V e r o c k e r u n g

2.4.51 Der überwiegende Teil der Berliner Brunnen verockert mehr oder weniger schnell. Dies führt zu großen Leistungsminde-
rungen. Es mußten deshalb immer erhebliche Mittel für den
Ersatz nicht mehr leistungsfähiger Brunnen bereitgestellt
werden. Die Berliner Wasserwerke widmeten sich deshalb
- etwa vor 20 Jahren beginnend - dem Problem der Brunnen-
alterung besonders intensiv. In jahrelangen eingehenden
Versuchen wurde erforscht, welche der bisher aufgeführten
Ursachen für die Alterung ihrer Brunnen zutreffen könnten.
Aufgrund der Ergebnisse sollten dann Maßnahmen gegen die
Alterung getroffen werden. Es stellte sich heraus, daß
die bis dahin bekannten Ursachen nicht für den Leistungs-
rückgang verantwortlich sein konnten. Es wurde daher nach
anderen Ursachen geforscht. Fotografische Aufnahmen mit
einer Unterwasserkamera, die eigens für die Brunnenunter-
suchungen konstruiert worden war, brachten Mitte der 50er
Jahre Inkrustationen zum Vorschein, deren Formen weniger
auf eine chemische als biologische Bildung schließen
ließen (Bilder 27 und 28).

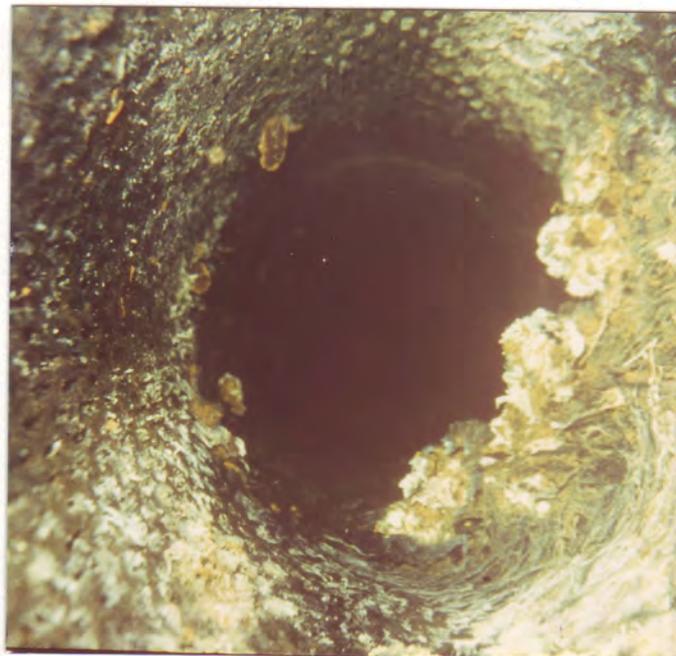


Bild 27

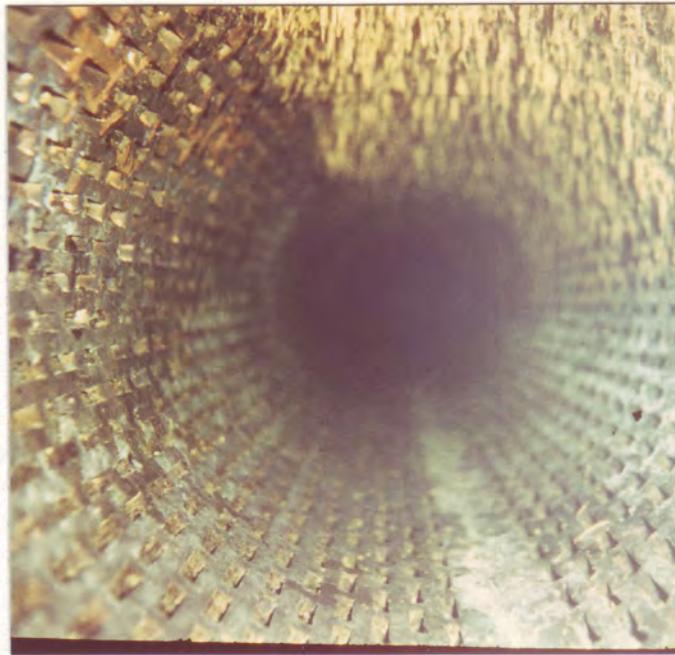


Bild 28

Beim Literaturstudium stieß man dann auf die Tatsache, daß Eisenabscheidungen aus eisenhaltigen Mineralwässern auf die Lebenstätigkeit von sogenannten Eisenbakterien zurückgeführt werden können. Adler und Rössler hatten dies Anfang des Jahrhunderts festgestellt (1/52). Beim Versand solcher Wasser fiel das Eisen nämlich in ganz kurzer Zeit aus. Man nahm zunächst an, daß es sich um eine rein chemische Oxidation handele, und versuchte - meist ohne Erfolg - , diese durch Sauerstoffentzug zu verhindern. Adler und Rössler konnten nun nachweisen, daß durch einen geringen Zusatz verschiedener Antiseptika der Eisenausfall ausblieb. Rund 30 Jahre später fand Adler, daß in den Mineralwässern hauptsächlich die Eisenbakterien Gallionella und Leptothrix vorkommen (1).

Eisen- und manganspeichernde Bakterien, die im folgenden nur noch kurz als Eisen- und Manganbakterien bezeichnet werden, sind unter bestimmten Voraussetzungen imstande, das im Wasser gelöst vorhandene zweiwertige Eisen und/oder zweiwertige Mangan aufzunehmen und in Form von unlöslichen

Eisen- und Manganverbindungen wieder auszuscheiden. Diese Vererzung erstreckt sich je nach Bakterienart auf verschiedene Zellbereiche der Bakterien, zum Teil werden Vererzungsprodukte auch frei abgeschieden.

Obwohl das Auftreten von Eisen- und Manganbakterien im Wasserwerksbetrieb schon vor fast 100 Jahren, nämlich 1878 - 1882, in Berlin zu "Wasserkalamitäten" geführt hatte, da man der Entwicklung von *Crenothrix polyspora* nicht Herr werden konnte, war diese unangenehme Eigenschaft der eisen- und manganspeichernden Mikroorganismen fast völlig in Vergessenheit geraten (). Beger betont z.B. 1937, daß die Eisenbakterien eine katalytische Wirkung bei der Eisenausfällung aus dem Wasser hätten, daß aber durch sie die Anwesenheit von Sauerstoff für die Oxidation auf keinen Fall überflüssig gemacht würde (3). Erst Baier beschreibt 1943 das Wachstum dieser Bakterien in Brunnen und gibt an, daß besonders eine Ockerbildung - vor allem durch *Crenothrix* und vereinzelt auch durch *Gallionella* - gefördert wird (2). Demgegenüber stellt Schneider 1952 fest, daß der Vorgang der Verockerung in den Brunnen ein rein chemischer sei, wobei allerdings z.T. Bakterien als Beschleuniger mitwirken könnten (53).

Allgemein galten die Eisen- und Manganbakterien lange Zeit als aerob. Man war deshalb folgerichtig der Meinung, daß sie in eisenhaltigen Grundwässern nicht existieren könnten; diese sind ja - von Spuren abgesehen - überwiegend sauerstofffrei, weil 2-wertiges Eisen und Sauerstoff nicht nebeneinander im Grundwasser bestehen können, ohne daß es zu einer Oxidation kommt. Durch die Arbeiten von Preobaschenskaja sowie Charlet und Schwartz (47) wurde dann aber eine Mikroaerophilie nachgewiesen. Auch Rippel-Baldes nahm an, daß für Eisenbakterien die Möglichkeit einer Lebenstätigkeit bereits in einem Bereich gegeben ist, in dem die spontane, rein chemische Oxidation unter Umständen wegen des fehlenden bzw. nur in Spuren vorliegenden Sauerstoffes noch nicht genügend wirksam sein kann (51).

Besonders Mitte der 50er Jahre erschienen einige Arbeiten über die Lebensbedingungen der sogenannten großen Eisen- und Manganbakterien (*Gallionella*, *Leptothrix*), die zum Teil in Reinkulturen gezüchtet worden sind. Danach sind günstige Bedingungen gegeben, wenn das pH des Wassers zwischen pH 5,4 und pH 7,2 liegt. Der Gehalt an 2-wertigem Eisen soll nicht kleiner sein als 1,6 mg/l Fe, aber auch 10 - 12 mg/l nicht übersteigen, da schon bei 14 mg/l Fe kein weiteres Wachstum der Bakterien mehr festzustellen war. Hoher Eisengehalt scheint also auf die Bakterien toxisch zu wirken. Weiterhin muß im Wasser Kohlensäure vorhanden sein.

Angaben über die Lebensbedingungen für die stäbchen- und kokkenförmigen Bakterien werden nicht genannt, außer für das Ferribakterium, das aber in den bisher untersuchten Brunnen noch nicht gefunden werden konnte (20).

Über die erforderliche Mindestkonzentration des Sauerstoffes, die wegen des praktisch sauerstofffreien Grundwassers fast als wichtigste Frage zu bezeichnen ist, werden keine Werte angegeben. Es wird lediglich festgestellt, daß sich bei sonst gleichen Bedingungen Eisen- und Manganbakterien keineswegs an Stellen höchsten Sauerstoffgehaltes finden. Eine Ausnahme scheint *Leptothrix crassa* zu sein, die sich bei gutem Sauerstoffangebot in der Nähe der Wasseroberfläche entwickelt. Da Massenentwicklungen der Bakterien auch bei Sauerstoffkonzentrationen unter 5 g/l O₂ auftreten, d.h. also auch in Wässern, die nur Spuren von Sauerstoff enthalten, könnte das für die Annahme von Rippel-Baldes der Mikroaerophilie sprechen (51). Es könnte aber auch sein, daß die Eisen- und Manganbakterien den für ihre Lebenstätigkeit erforderlichen Sauerstoff aus der Reduktion von Nitraten oder Sulfaten gewinnen. Letztere waren in allen bisher untersuchten Brunnenwässern vorhanden. Nitrite, die bei der Reduktion von Nitraten entstehen müssen, konnten allerdings nicht nachgewiesen werden.

Sauerstofflieferanten könnten auch andere Bakterien, wie z.B. sogenannte Desulfurikanten, d.h. sulfatreduzierende Bakterien sein. Der dabei entstehende Schwefelwasserstoff wurde in fast allen Brunnenwässern in geringen Mengen gefunden. Es besteht deshalb noch keine Klarheit darüber, ob die Eisen- und Manganbakterien tatsächlich mikroaerophil leben können, ob sie sich den Sauerstoff durch Reduktion von Nitraten oder Sulfaten selbst schaffen oder ob dies andere Bakterien - z.B. sulfatreduzierende - für sie übernehmen.

Die geschilderten Erkenntnisse über Eisen- und Manganbakterien wurden beim Studium der einschlägigen Literatur gewonnen, nachdem der Verfasser Mitte der 50er Jahre zu dem Schluß gekommen war, daß die unter 2.1 bis 2.4.4 genannten Vorgänge nicht die Ursache für die zum Teil recht intensive Alterung der Berliner Brunnen sein konnten. Sie bestärkten die Vermutung, daß wegen der in den Filterrohren vorgefundenen Inkrustationsformen Eisen- und Manganbakterien an der Brunnenalterung - zumindest im Berliner Raum - einen erheblichen Anteil haben müßten. Die weiteren Untersuchungen wurden deshalb auf den Nachweis und die Auswirkungen dieser Bakterien konzentriert.

Zunächst mußte festgestellt werden, ob in den Brunnen überhaupt eisen- und manganspeichernde Bakterien vorhanden sind. Dies erfolgte mittels gläserner Aufwuchsträger, die an einer Perlonschnur in verschiedenen Tiefen eingehängt worden waren. Relativ schnell siedelten sich auf ihnen Gallionella, Leptothrix, Siderocapsa und Siderococcus an (Bilder 29-31).



Bild 29
Gallionella ferruginea

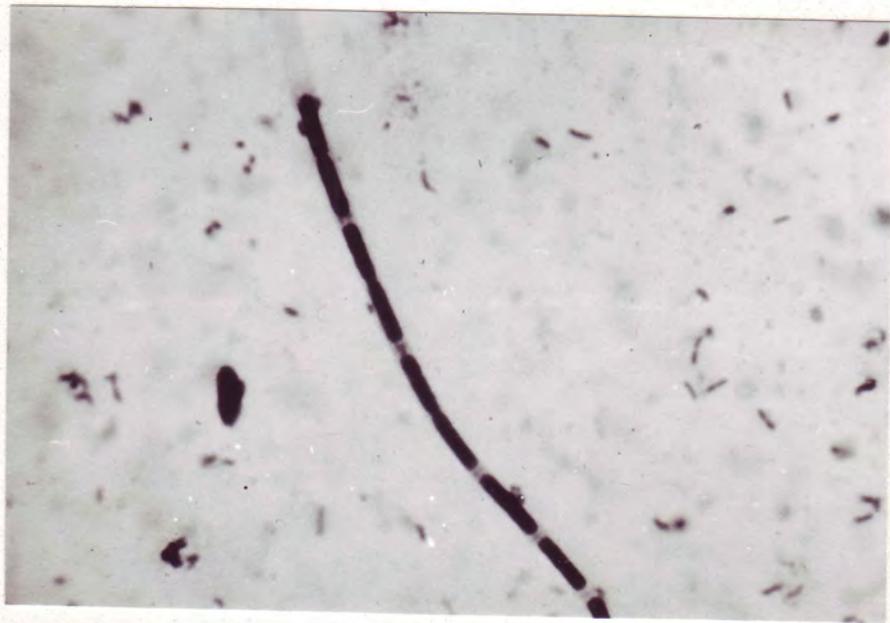


Bild 30
Leptothrix

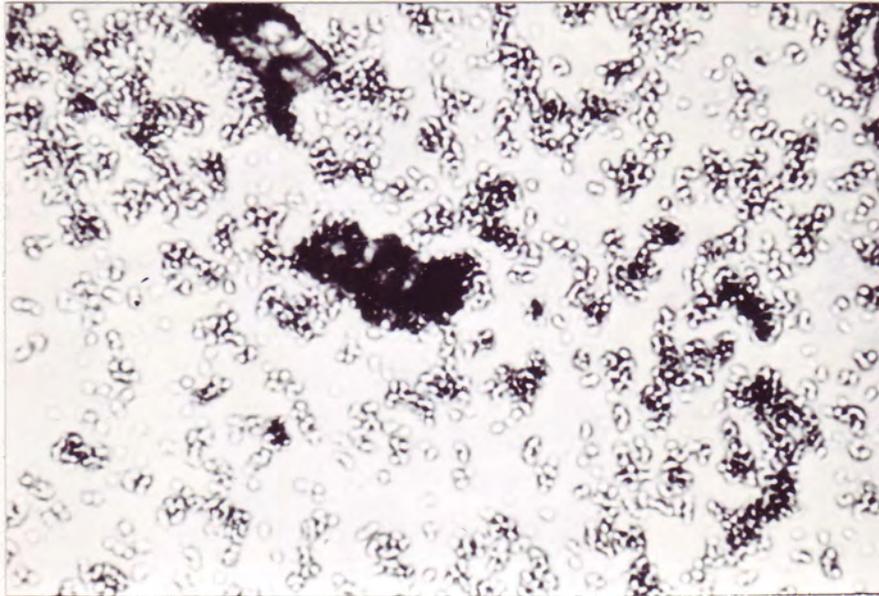


Bild 31
Siderococcus spec.

Nach 2 - 4 Wochen hatte die Lebenstätigkeit dieser Bakterien auf mehreren Aufwuchsträgern (Bild 32) bereits zu einer Braunfärbung geführt, d.h. die Bakterien hatten bereits Eisen und Mangan in sich gespeichert. Besonders innerhalb der Filterstrecke siedelten sich *Gallionella ferruginea* vergesellschaftet mit *Gallionella minor* und *Leptothrix ochracea* an. Auffällig war, daß *Gallionella* besonders in größeren Tiefen gutes Wachstum zeigte.

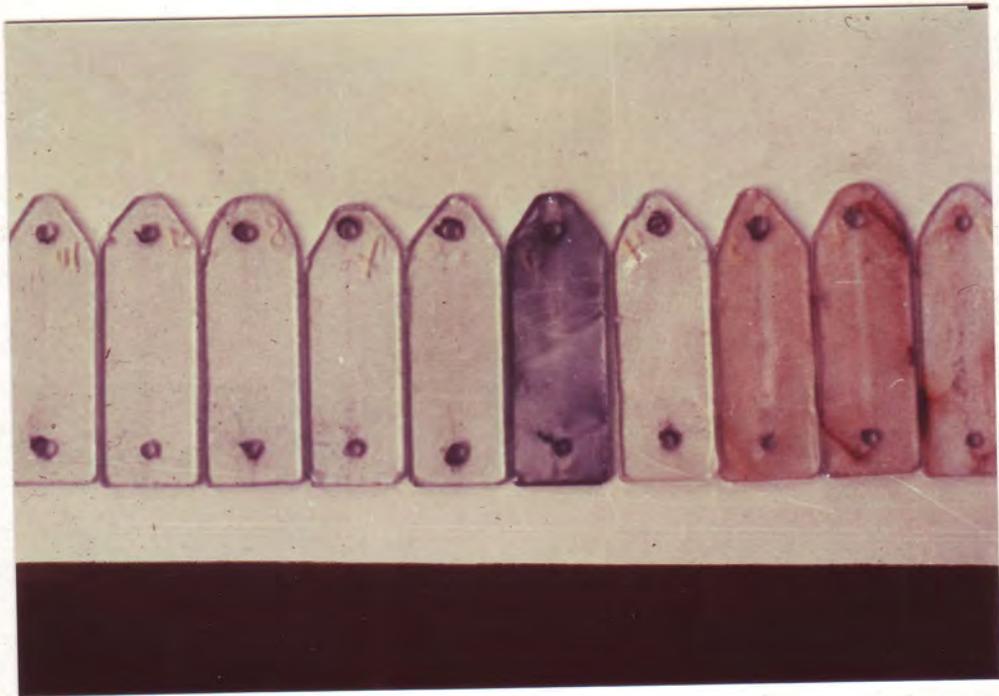


Bild 32

Um nun festzustellen, ob das Wachstum der Eisen- und Manganbakterien tatsächlich zur Brunnenalterung beiträgt, mußte versucht werden, das Wachstum durch Impfung mit keimabtötenden Mitteln zu verhindern oder zumindest stark einzudämmen und Vergleiche der Verockerungsintensität zwischen "geimpften" und "nicht-geimpften" Brunnen zu ziehen. Wenn dies gelingen würde, wäre die Bedeutung der Eisen- und Manganbakterien für die Brunnenalterung erwiesen. Vier alte, nebeneinander liegende Brunnen, die alle bereits nach wenigen Betriebsjahren stark verocker-ten, wurden dazu herangezogen. Es handelte sich um mit Steinzeugfilterrohren ausgerüstete Brunnen. Sie wurden vorher regeneriert und auf ihre Leistung hin überprüft. Beide Brunnen zeigten nach der Regenerierung wieder eine sehr gute Leistung, die fast an die ursprüngliche Neu-leistung herankamen. Ihre Filterrohre waren restlos sauber, was mittels Unterwasserkamera festgestellt werden konnte. Zwei der Brunnen wurden monatlich einmal mit einer 5 %igen Chlorkalklösung behandelt. Dazu wurden die Brunnen für 24 Stunden außer Betrieb genommen und danach ohne jedes Abpumpen sofort wieder auf Betrieb geschaltet. In den

beiden anderen Brunnen wurden die Bakterien ihrer natürlichen Entwicklung überlassen. Als keimabtötendes Mittel kam Paracaporit zur Verwendung, weil es keine Rückstände in der Lösung hinterläßt, die sich mit der Zeit im Brunnenumpf ansammeln würden. In die rd. 30 m tiefen Brunnen wurden 60 l dieser Lösung durch das Peilrohr eingefüllt. Diese Menge entsprach etwa einer Zugabe von 1 g wirksamen Chlores pro 1 l Wasser, bezogen auf den Inhalt des Filterrohres.

Die laufende Beobachtung der Brunnen zeigte, daß die nicht-behandelten Brunnen schon nach einer Betriebszeit von 1 1/2 Jahren sehr starke Inkrustationen aufwiesen (Bild 33).

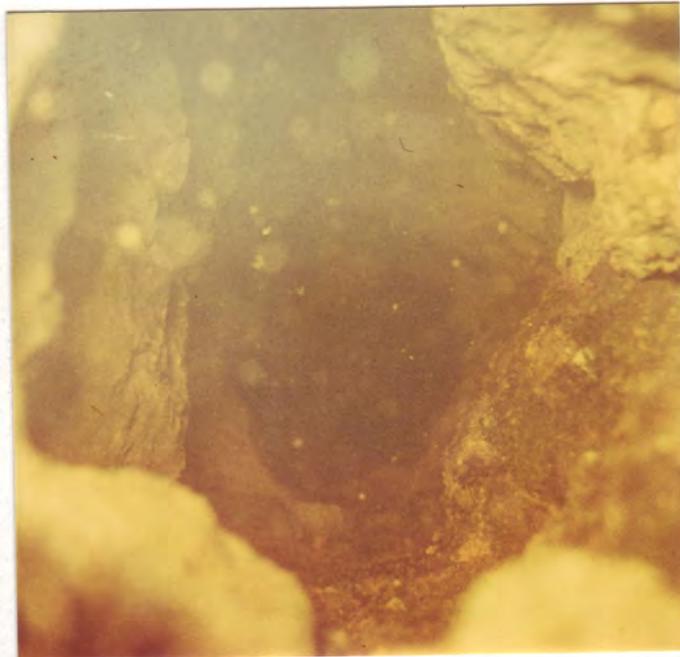


Bild 33

Von den Filterrohrschlitzen war nichts mehr zu erkennen. Selbst der Filterrohrquerschnitt war schon sehr stark zugewachsen. Die behandelten Brunnen waren dagegen noch völlig sauber. Im Bild 34 sind deutlich die Filterrohröffnungen zu erkennen.

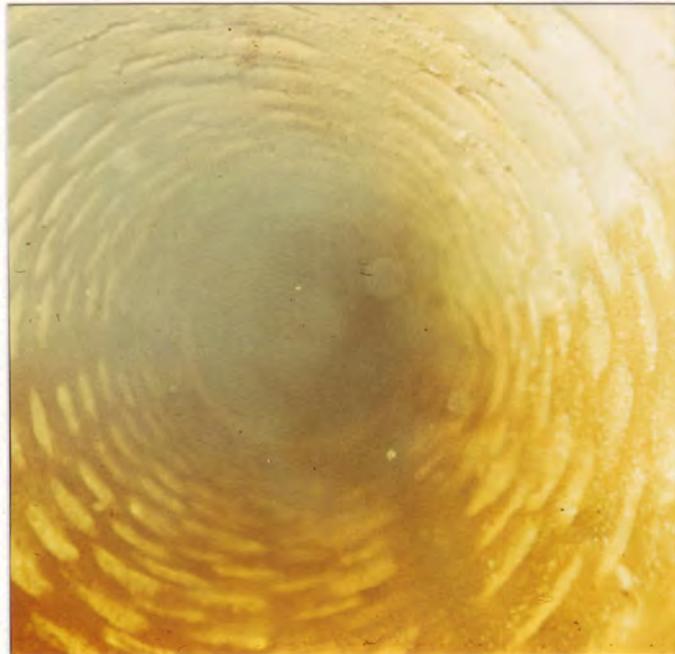


Bild 34

Die Brunnenleistungen verhielten sich entsprechend, d.h. der Leistungsrückgang bei den behandelten Brunnen war unbedeutend, der der nicht-behandelten dagegen ganz erheblich. Ergänzende Versuche wurden später auf eine größere Brunnenanzahl in verschiedenen Gewinnungsgebieten ausgedehnt. Die Ergebnisse waren die gleichen. Hierbei wurde auch der Behandlungsturnus auf 2 bzw. sogar 3 Monate vergrößert. Der Sinn war, den wirtschaftlichsten Turnus zu ermitteln. Es stellte sich heraus, daß der 3-Monats-Turnus unzweckmäßig, weil zu wenig wirksam ist. Das Chlor kann nämlich nur die Eisen- und Manganbakterien abtöten, vermag aber nicht, die von den Bakterien bereits in sich gespeicherten und evtl. sogar schon vererzten Eisen- und Manganverbindungen aufzulösen. Es darf also zwischen den Behandlungen zu keiner merklichen Eisen- und Manganaufnahme durch die Bakterien kommen, weil die in den Filterrohrschlitzen abgelagerten Inkrustationen im Brunnen verbleiben. Bei zu großen Behandlungsabständen wachsen diese

mit der Zeit immer mehr an und führen - zwar mit deutlicher Verzögerung - dann trotzdem zu einer stark abgeminderten Brunnenleistung.

Die Versuche hatten bewiesen, daß Eisen- und Manganbakterien - zumindest im Berliner Raum - die Hauptursache für die Verockerung sind. Ihre Ergebnisse können wie folgt zusammengefaßt werden. Der Vollständigkeit halber werden hierbei alle Erkenntnisse - auch wenn sie nicht unter den Abschnitt 2.4.5 fallen - zusammengefaßt.

- 1) Es gibt ~~ke~~ i n Brunnenmaterial, das n i c h t verockert. Auch das in dieser Hinsicht oft als neutral bezeichnete Steinzeug verockert entgegen früheren Behauptungen im gleichen Maße wie metallene Filterrohre.
- 2) Die Alterungsprodukte bestehen hauptsächlich aus Eisen- und Manganverbindungen.
- 3) Für die Theorie, daß eine turbulente Strömung die Ausfällung von Eisen- und Manganverbindungen beschleunigt, konnte keine Bestätigung gefunden werden. Auch Brunnen mit geringer Leistung, bei denen die Reynold'sche Zahl im laminaren Bereich lag, verockerten. Es ist deshalb zumindest fraglich, ob zwischen Strömungsart und Brunnenalterung ein Zusammenhang besteht.
- 4) Die Verockerung ist nur in geringem Umfang auf rein chemische Vorgänge zurückzuführen. Karbonatausfällungen im Sinne der Versinterung sowie chemisch bedingte Ablagerungen von Eisenhydroxiden und Eisenoxidhydraten wurden nur vereinzelt gefunden.
- 5) Die Hauptursache für die Verockerung im Berliner Raum sind Eisen- und Manganbakterien. Sie sind zwar schon vor Inbetriebnahme eines Brunnens im ungestörten,

äußerst langsam fließenden Grundwasserstrom vorhanden; da sie aber nicht eigenbeweglich sind und ihre Nahrung aus dem vorbeiströmenden Wasser aufnehmen müssen, können sie sich wegen des geringen Nahrungsangebotes nicht in größeren Massen entwickeln und deshalb auch nicht zu einer Verstopfung des Untergrundes führen. Erst nach der Inbetriebnahme eines Brunnens werden ihnen wegen des größeren Nahrungsangebotes infolge größerer Strömungsgeschwindigkeiten bessere Entwicklungsmöglichkeiten geboten. Die Bakterien vererzen dann auch und führen durch Ablagerung ihrer Ausscheidungen in den Filterrohrschlitzen und in der Kiesschüttung zum bekannten Leistungsrückgang der Brunnen.

- 6) Die Intensität der Verockerung ist beim hochbelasteten Brunnen entsprechend größer. Eine Tendenz der Wachstumsausbreitung ist jedoch nicht zu erkennen.
- 7) Die Verockerung konnte durch Verwendung von keimabtötenden Mitteln stark gebremst bzw. völlig verhindert werden. Die Behandlung mit diesen Mitteln muß mindestens einmal monatlich erfolgen. Die Dosierung ist so zu wählen, daß dem im Brunnenrohr stehenden Wasser etwa 1 g/l Chlor zugesetzt wird.

2.4.52 Erfahrungsgemäß spielen in der Wassergewinnung so viele bakteriologische, chemische, geologische und hydraulische Momente eine Rolle, daß es falsch gewesen wäre, diese Ergebnisse ohne weiteres auch auf andere Wassergewinnungsgebiete zu übertragen. Es war deshalb notwendig, die im Berliner Raum gewonnenen Erkenntnisse daraufhin zu untersuchen, ob sie Allgemeingültigkeit besitzen. Hässelbarth und Lüdemann vom Institut für Wasser-, Boden- und Lufthygiene wurden deshalb vom DVGW (Deutscher Verein für Gas- und Wasserfachmänner) mit weiteren Untersuchungen beauftragt, für die sich eine große Anzahl von Wasserwerken der Bundesrepublik Deutschland zur Verfügung gestellt haben.

Die von den Berliner Wasserwerken vor allem empirisch gewonnenen Erkenntnisse wurden durch Hässelbarth und Lüdemann auch wissenschaftlich vollauf bestätigt (20). Die biologisch bedingte Verockerung ist demnach sehr weit verbreitet. Ihr unterliegen jedoch nicht alle Brunnen, weil im Grundwasser zwar fast überall Eisen- und Manganbakterien vorkommen, für sie aber nicht immer ideale Lebensbedingungen für eine Massenentwicklung gegeben sein müssen. Das Kriterium zu finden, unter welchen Voraussetzungen ideale Lebensbedingungen vorhanden sind, war deshalb von großer Wichtigkeit, vor allem für die Praxis, weil dann schon beim ersten Pumpversuch vorausgesagt werden kann, ob eine Verockerung zu erwarten ist oder nicht. Dann könnte z.B. rechtzeitig auf ein in dieser Hinsicht nicht gefährdetes Wassergewinnungsgelände ausgewichen werden. Auch die Entscheidung, ob neue Brunnen mit keimabtötenden Mitteln behandelt werden müssen, wäre schon vor bzw. spätestens bei ihrer Inbetriebnahme möglich. Weiterhin würde die Entscheidung erleichtert, ob neue Brunnen mit Einrichtungen, wie z.B. mit Säuerungsrohren in der Kiesschüttung ausgerüstet werden sollten, die eine spätere Regenerierung wirksamer machen.

Amerikanische Versuche, die vor etwa 15 Jahren durchgeführt worden sind, hatten eine Beziehung zwischen dem Redoxpotential eines Wassers und dem massenhaften Auftreten bestimmter Gattungen von Eisen- und Manganbakterien ergeben (36). Hässelbarth und Lüdemann fanden dies nicht bestätigt. Versuche von Schweissfurth ließen den Schluß zu, daß die Entwicklungsfähigkeit dieser Bakterien aber allgemein redoxabhängig sein könnte (54).

Hässelbarth und Lüdemann stellten aus diesem Grund das Redoxpotential der untersuchten Brunnen und deren Zustand

Tabelle 1

Datum	Wasserwerk	Brunnen	Redox- potential $E_{H_2,0}$	mV	rH	pH	Z u s t a n d
21. 7.64	Mannheim- Käfertal	19	+	89	18,11	7.55	starke Ocker- abscheidung
3.12.64		18	+	90	18,28	7.52	" "
21. 7.64		24	+	114	19,06	7.6	" "
3.12.64		24	+	129	19,56	7.6	" "
23. 7.64	Hanau	2	+	109	17,39	6.85	starke Ocker- abscheidung
4.12.64		2	+	100	16,78	6.7	" "
23. 7.64		1	+	106	17,18	6.8	" "
4.12.64		1	+	139	18,10	6.7	" "
9. 6.64	Nordhorn	24	-	81	11,14	6,94	sauber
29. 9.64		24	-	91	10,42	6.75	"
10. 6.64	Hünxe	5	+	64	16,37	7.1	Ockerabscheidung
30. 9.64		5	+	59	15,79	6.9	" "
10. 6.64		6	+	69	17,13	7.4	" "
30. 9.64		6	+	99	17,75	7.2	" "
12. 6.64	Mönchen- gladbach	4	+	204	20,1	6.6	starke Ocker- abscheidung
2.10.64		4	+	219	20,41	6.5	" "
12. 6.64		5	+	230	21,18	6.7	" "
20.10.64		5	+	249	21,42	6.5	" "
11. 6.64	Krefeld	1a	+	54	16,22	7.2	Ockerabscheidung
1.10.64		1a	+	74	16,70	7.1	" "
11. 6.64		2a	+	84	17,04	7.1	" "
1.10.64		2a	+	100	17,38	7.0	" "

Tabelle 2

Datum	Wasserwerk	Brunnen	Redox- potential $E_{H_2,0}$ mV	rH	pH	Inbetrieb- nahme	Photogr. Untersu- chungen	Z u s t a n d
6.10.65	Beelitzhof- Lindwerder	22	- 36	13,64	7,43	16. 5.55	6. 6.61	keine Verockerungen
		21	+ 4	14,99	7,43	16. 5.55	8. 6.61	" "
		20	- 36	13,58	7,4	16. 5.55	12. 6.61	" "
		19	- 36	13,56	7,39	16. 5.55	14. 6.61	" "
		18	- 40	13,54	7,45	16. 5.55	19. 6.61	" "
		17	- 26	13,88	7,38	25. 4.54	21. 4.64	" "
		16	- 26	13,94	7,41	25. 4.54	23. 4.64	" "
		15	- 36	13,66	7,44	29. 4.54	24. 4.64	" "
		14	- 41	13,51	7,45	25. 4.54	30. 4.64	" "
		13	- 31	13,73	7,39	25. 4.54	22. 5.64	beginnende Verockerung
		12	- 6	14,52	7,36	25. 4.54	3. 6.64	" "
		11	0	14,92	7,46	30. 4.54	8. 6.64	keine Verockerungen
		10	- 31	13,77	7,41			" "
7.10.65	Jungfern- heide	V,1	+ 19	15,5	7,43	26. 4.62	4. 4.63	Ocker-Ansatz
		V,2	+ 64	17	7,42	26. 4.62	17. 4.63	" "
		E II,1	- 51	13,25	7,49	7. 6.60	12. 6.63	sauber
		E II,6	- 11	13,94	7,16	12. 7.60	29. 5.64	" "
		E I,1	- 21	14,19	7,45			" "
		E I,2	- 22	14,44	7,41	30. 4.56	30. 9.63	" "
		E I,8	+ 19	15,34	7,35	1.11.57	30. 4.63	" "
		E I,9	+ 49	16,43	7,39	28. 3.58	24. 3.63	Ocker-Ansatz
		E I,10	+ 194	21,20	7,32	28. 3.58	27. 5.63	" "
		E I,11	+ 169	20,36	7,32	15. 4.58	3. 9.63	" "
		E I,12	0	14,72	7,36	9. 5.58	5. 9.63	" "
		14. 7.66	WABOLU	I	+ 123	19,4	7,6	3. 9.65

- nämlich ob sie verockert waren oder nicht - gegenüber. Die Ergebnisse wurden von ihnen in folgenden Tabellen zusammengefaßt (20).

(Tabellen 1 und 2)

Von wenigen Ausnahmen abgesehen, ist eine deutliche Abhängigkeit zwischen Redoxpotential und Verockerung zu erkennen. Sobald nämlich die Redoxpotentiale - grob verallgemeinert - positive mV-Werte haben, tritt eine Verockerung ein, bei negativen nicht.

Die Ausnahmen könnten z.B. wie folgt erklärt werden. Die wenigen, aus der Reihe fallenden Brunnen, die trotz ihres negativen Redoxpotentials verockert sind, weisen diese Verockerungen meist nur an einzelnen Stellen des Filterrohres auf. Es wäre denkbar, daß an diesen Stellen ein Grundwasser in den Brunnen eintritt, das ein positives Redoxpotential aufweist, dessen prozentualer Anteil am Brunnenwasser aber so klein ist, daß dieser positive Wert durch Wasser aus anderen Schichten überlagert wird und daß das Redoxpotential des Gesamtwassers trotzdem negativ ist. Eine Klärung dieses Problems ist nur möglich durch Messungen des Redoxpotentials in verschiedenen Tiefen des Brunnens, und zwar in einem voll verfilterten Peilrohr in der Kiesschüttung. Meßtechnische Schwierigkeiten, die noch nicht überwunden werden konnten, haben derartige Versuche bisher verhindert.

Die Schlußfolgerungen Hässelbarths und Lüdemanns, daß es einen Grenzwert des Redoxpotentials geben muß, der den Bereich der günstigen von dem der ungünstigen Lebensbedingungen für die Massenentwicklung von Eisen- und Manganbakterien trennt, haben sich vollauf bestätigt. Bei den Berliner Wasserwerken wurden bisher insgesamt etwa 300 Brunnen auf die Richtigkeit dieses Grenzwertes hin untersucht. Von wenigen Ausnahmen abgesehen haben sich die danach gemachten Voraussagen, ob ein Brunnen zur Verockerung neigt oder nicht, erfüllt.

Zusammenfassend kann aufgrund der Untersuchungsergebnisse von Hässelbarth und Lüdemann festgestellt werden, daß Massenentwicklungen von Eisen- und Manganbakterien, die zu einer biologischen Verockerung führen, unter folgenden Bedingungen auftreten:

- 1) Anwesenheit von Eisen- und Manganbakterien.
- 2) Gegenwart von z w e i wertigen Eisenionen und Manganionen. Die Mindestkonzentration von zweiwertigem Eisen, die in verschiedener hydrobiologischer Literatur mit 1,6 mg/l angegeben wird, gilt offenbar nur für r u h e n d e Lösungen. In f l i e ß e n d e m Wasser kann auch bei niedrigeren Konzentrationen mit guten Entwicklungsmöglichkeiten von Mikroorganismen gerechnet werden, weil dann wegen des ständigen Nachschubs an eisenhaltigem Wasser ein günstigeres Nährstoffangebot vorliegt.

Bei Konzentrationen unter 0,2 mg/l Fe ist nicht mit einer Verockerung zu rechnen, zumindest nicht in einem Ausmaß, das zu einem Leistungsrückgang des Brunnens führt. Sofern allerdings wasserberührte Brunntenteile, wie Filterrohre und Unterwasserpumpen, aus eisenhaltigem Werkstoff bestehen und es zu einer Korrosion kommt, können mit der Zeit zweiwertige Eisenionen als Korrosionsprodukte in Lösung gehen, als Nahrungsquelle für eisenspeichernde Bakterien dienen und dann auch bei kleineren Konzentrationen zur Verockerung führen. Aus den laufenden Wasseranalysen ist diese örtliche Zunahme an zweiwertigen Eisenionen oft nicht zu erkennen.

- 3) Das Redoxpotential muß (bezogen auf die Normalwasserstoffelektrode $E_{H_2,0}$) edler sein als - 10 mV, wobei noch ein unbestimmter Bereich von ± 20 mV zu berücksichtigen ist. Das Redoxpotential muß also praktisch positiv sein.

- 4) Die Fließgeschwindigkeit des Wassers muß gegenüber den natürlichen, d.h. ungestörten Verhältnissen im Untergrund deutlich erhöht sein, damit das erforderliche höhere Nährstoffangebot vorhanden ist. Dies ist beim Brunnenbetrieb immer gegeben.

Lt. neuesten Untersuchungen (20) reichen schon Strömungsgeschwindigkeiten von $0,1 \text{ m/h} \hat{=} 0,028 \text{ mm/s}$ aus.

Diese Erkenntnisse sind äußerst wichtig, weil sie erst überhaupt ermöglichen, bereits vor oder spätestens bei Inbetriebnahme eines Brunnens festzustellen, ob bei ihm mit einer Verockerung zu rechnen sein wird.

Alle vier Bedingungen müssen stets gleichzeitig gegeben sein. Ist eine nicht erfüllt, so bleibt eine biologische Verockerung aus, oder sie wird unterbrochen. Eisen- und manganspeichernde Bakterien sind überall zu erwarten. Unter ungünstigen Bedingungen sind sie jedoch wenig zahlreich und zeigen keine Vererzung.

- 2.4.53 Der Vorgang bei der biologischen Verockerung ist chemisch gesehen der gleiche wie bei der rein chemischen Verockerung, wo ebenfalls Energie frei wird, die in den Gleichungen des Abschnittes 2.4.23 nur nicht aufgeführt ist. Diese Energie beträgt pro mol Fe 13,7 kcal. Sie wird von den Eisen- und Manganbakterien zum Leben benutzt. Über die Herkunft des O_2 , der dabei genauso notwendig ist wie bei der rein chemischen Verockerung, besteht zur Zeit noch keine eindeutige Klarheit.

- 2.4.54 Eine Massenentwicklung von Eisen- und Manganbakterien kann nach Verfahren des Verfassers durch Behandlung mit keimabtötenden Mitteln stark eingedämmt bzw. verhindert werden (28). Es ist zweckmäßig, mit dieser Behandlung sofort nach Inbetriebnahme eines Brunnens zu beginnen und sie dann turnusmäßig durchzuführen. Für den Behandlungs-

abstand kann ein allgemeingültiger Wert nicht angegeben werden. Er ist abhängig von der Aufwuchsgeschwindigkeit der Eisen- und Manganbakterien. Zwischen den Behandlungen darf es möglichst nicht zu einer Eisen- oder Manganaufnahme durch die Bakterien kommen. Die Behandlung vermag nämlich nur, die Bakterien - als organische Bestandteile - abzutöten. Das bereits gespeicherte Eisen und Mangan verbleibt ungelöst als Inkrustation an Ort und Stelle. Der notwendige Behandlungsabstand muß deshalb in Zweifelsfällen durch Kontrollen der Aufwuchsgeschwindigkeit der Bakterien festgelegt werden. Es gibt Brunnen, in denen die Lebensbedingungen für Eisenbakterien außergewöhnlich günstig sind und in denen das Wachstum deshalb so schnell geht, daß eine *k o n t i n u i e r l i c h e* Behandlung mit keimabtötenden Mitteln vorgenommen werden muß. Im Berliner Raum hat sich ein Abstand von *e i n e m* Monat als notwendig, aber auch als ausreichend erwiesen.

Die Chlormenge soll so groß sein, daß auf 1 l Wasser im Filterrohr und Aufsatzrohr 1 g aktives Chlor kommt. Einzelheiten über die Behandlung sind im DVGW-Arbeitsblatt W 131 "Hinweise zur Verhütung der biologischen Brunnenverockerung" enthalten (14).

Dosierungsbeispiel:	Wassertiefe im Brunnen	30 m
	Brunnenrohrdurchmesser	200 mm
	Rohrinhalt	rd. 30 l/m
	Wasserinhalt im Rohr	900 l
	erforderl. Chlormenge: (bei 1 g Cl/1 l Wasser)	900 g
	erforderl. Paracaporit- menge	rd. 2,7 kg
	(enthält 35-38 % wirk- sames Chlor)	

Da anfangs geeignete Geräte nicht zur Verfügung standen, wurde die gewählte 5 %ige Chlorlösung zunächst nur durch das Peilrohr in den stillgelegten Brunnen und somit in-

direkt in das Filterrohr eingefüllt. Aufgrund des größeren spezifischen Gewichtes sinkt die Lösung in die Tiefe. Wir waren uns klar darüber, daß diese Methode nur bis zu einer begrenzten Brunnenwassertiefe wirksam sein kann. In der Praxis haben sich etwa 30 m als Grenztiefe herausgestellt. Bei größeren Tiefen sind nur Teilerfolge möglich, weil die Lösung dann die unteren Bereiche eines Brunnens allein durch ein Absinken nicht mehr erreicht.

Die Lösung muß aber möglichst in jeder Tiefe in gleicher Dosierung in das Brunnenrohr eingebracht werden, damit sie überall gut zur Wirkung kommt. Die Berliner Wasserwerke haben deshalb erstmalig ein geländegängiges Spezialfahrzeug im Einsatz, das in einem Tank einen für mehrere Brunnen ausreichenden Vorrat an Chlorlösung mit sich führen kann. Darüber hinaus ist es mit einer Vorrichtung ausgerüstet, die es erlaubt, einen mit einer Düse versehenen Schlauch durch das Peilrohr einzuführen, über die gesamte Brunnentiefe zu verfahren und dabei eine konstante Menge an Chlorlösung an das Wasser abzugeben. Es können damit Brunnen mit Tiefen von über 100 m einwandfrei behandelt werden. Die Bearbeitungskapazität pro Monat liegt etwa bei 250 - 300 Brunnen.

Nach der Behandlung bleibt der Brunnen etwa 24 Stunden außer Betrieb. Er steht danach ohne Abpumpen dem Betrieb wieder zur Verfügung.

Die Erfolge der Behandlung sind durchweg als gut zu bezeichnen. Sie sollen an einem Beispiel demonstriert werden, und zwar an einem ca. 35 m tiefen, mit kupfernen Brückenschlitzfilterrohren NW 200 ausgerüsteten Versuchsbrunnen.

Die hauptsächlichsten Daten der Wasseranalyse sind folgende:

Fe	0,7 mg/l
Mn	0,6 mg/l
KMnO ₄ -Verbrauch	11,5 mg/l
Gesamthärte	18,2 °d
Karbonathärte	10,6 °d
NH ₄ ⁺	0,8 mg/l
NO ₂ ⁻	0,01 "
NO ₃ ⁻	2,6 "
SO ₄ ⁻⁻⁻	130 "
pH	6,92
E _{OH}	+ 84 mV

Dieser Brunnen, der in diluvialen Sanden steht, wurde zunächst ohne jede Behandlung mit einer Leistung von $Q = 150 \text{ m}^3/\text{h}$ betrieben. Am ständigen Anwachsen des Durchflußwiderstandes in der Kiesschüttung und in den Filterrohrschlitzen, der nach 2.7.3 beobachtet wurde, war eine steigende Verockerung abzulesen. Nach einer 5-jährigen Betriebszeit ging der Brunnen außer Betrieb. Die fotografische Aufnahme des Filterrohrinneren mittels Unterwasserkamera brachte die vermutete starke Verockerung zum Vorschein. Im Bild 35 kommt dies deutlich zum Ausdruck. Die Filterrohrschlitze sind überhaupt nicht mehr zu erkennen.

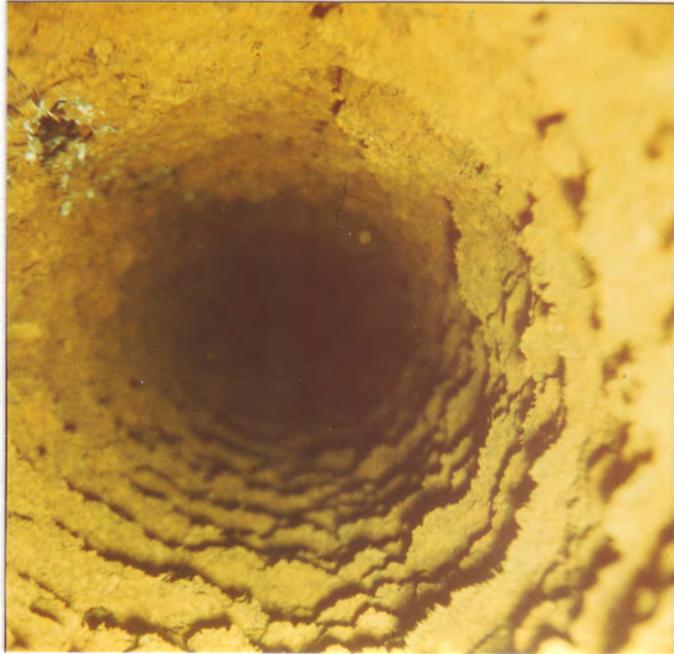


Bild 35

Der Brunnen wurde mit den unter 2.8 beschriebenen Methoden regeneriert. Er machte danach den Eindruck eines neuen Brunnens (Bild 36).

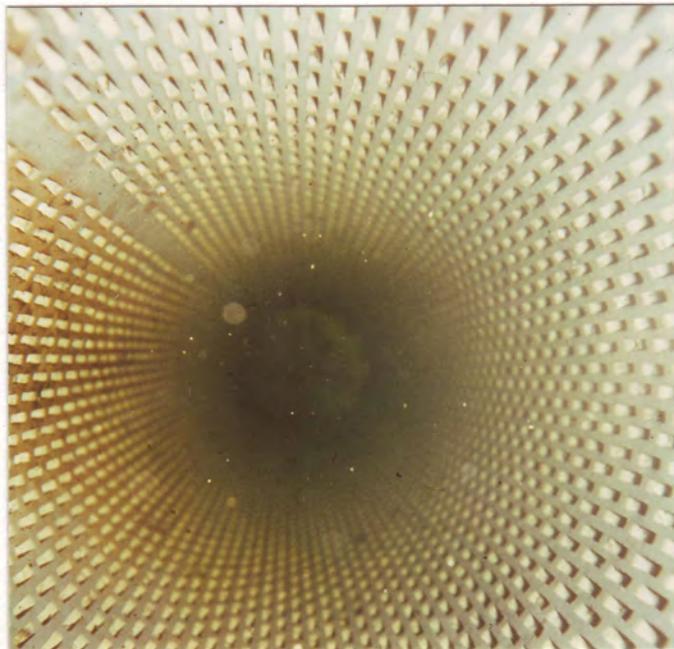


Bild 36

Der Durchflußwiderstand war auf den Anfangswert zurückgegangen. Der Brunnen wurde nunmehr wiederum über 5 Jahre betrieben, jedoch monatlich auf die geschilderte Art behandelt. Der Erfolg ist fast verblüffend gut, wenn man bedenkt, daß die Bilder 35 und 37 nach einer gleichlangen Betriebszeit von jeweils 5 Jahren aufgenommen worden sind, nur mit dem Unterschied, daß beim zweiten Versuchsturnus (Bild 37) eine Behandlung erfolgte.

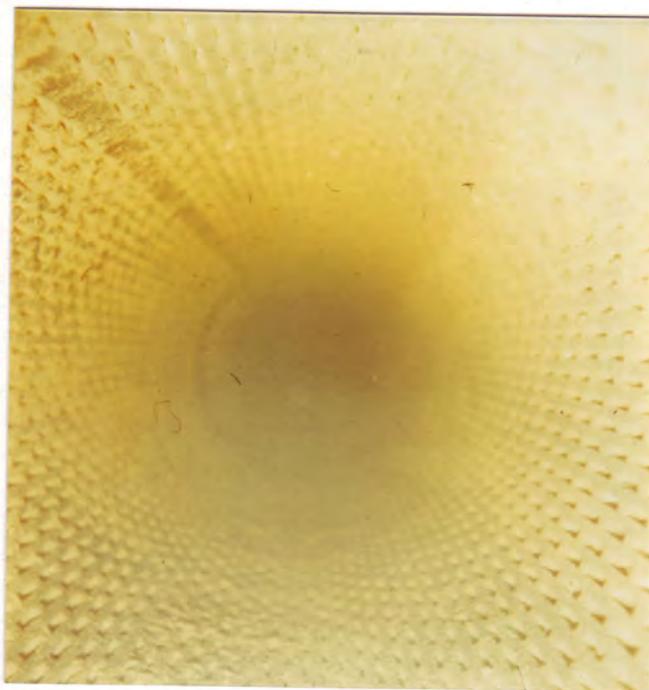


Bild 37

2.4.6 E i n f l u ß d e s B r u n n e n m a t e r i a l s

Lange Zeit herrschte die Meinung vor, daß die Verockerung nur in Brunnen auftritt, die mit metallischen Brunnenrohren ausgerüstet sind, und daß sogenannte neutrale Materialien, wie z.B. Steinzeugfilterrohre, nicht gefährdet seien. Der Verfasser hat schon in den 50er Jahren nachgewiesen, daß auch diese Materialien keine Ausnahme bilden. Er hat aus Versuchsgründen Brunnen mit Filterrohren aus den verschiedensten Materialien, wie Kupfer, Kunststoff, kunststoffüberzogenem Stahl, Steinzeug usw.

ausgerüstet. Kein Material ist gegen die Verockerung gefeit, sofern die chemischen und biologischen Voraussetzungen dafür gegeben sind. Unterwasseraufnahmen aus jüngster Zeit weisen Inkrustationen auch in Filterrohren aus kunstharzgetränktem Pressholz nach. Wahrscheinlich hat sich die lange vorherrschende Meinung der besonderen Gefährdung von metallischen Brunnenrohren dadurch bilden können, daß man zumindest bei stählernen Rohren Verockerung mit Korrosion verwechselte und dann alle Metalle in einen Topf warf.

2.4.7 G e f ä h r d e t e r B r u n n e n b e r e i c h

2.4.71 Mit Unterwasser- oder Fernsehkamera - wobei die U-Kamera den Vorteil besserer und farbiger Bilder hat - kann selbstverständlich nur das Innere eines Brunnens eingesehen werden. Über das, was sich außerhalb der Filterrohrschlitze in der Kiesschüttung und im gewachsenen Boden abspielt, können damit keine Aussagen gemacht werden. Trotzdem geben fotografische Aufnahmen der Filterrohre gute Aufschlüsse.

Frühere Auffassungen, daß die Verockerung besonders exponierte Stellen eines Brunnenfilterrohres zuerst befällt, z.B. die Filterrohroberkante oder bei Heberleitungsbrunnen den Bereich des Saugrohres, sind nicht generell gültig. Der Verfasser hat dies an Versuchsbrunnen gleicher Bauweise und im gleichen Grundwasserleiter festgestellt. Z.B. wurden 2 Brunnen mit Förderleistungen von 40 bzw. 120 m³/h, die sich also wie 1:3 verhielten, über mehrere Jahre beobachtet. Die Brunnen wurden in gewissen Abständen fotografisch untersucht.

Der zeitliche Verlauf der Verockerungsintensität ist deutlich zu erkennen, aber auch wie unterschiedlich die Inkrustationen über die Tiefe des Brunnens verteilt sind. Der eine Brunnen beginnt oben, der andere unten zu verockern. Nach einer rd. 3-jährigen Betriebszeit wächst bei V_1 die Verockerung weiter nach unten und erstreckt sich bis zu 10 m unter die Filterrohroberkante. Die stärksten Ablagerungen befinden sich in der Mitte der Filterstrecke. Sie sind sehr unregelmäßig verteilt. Bei V_2 ist die Verockerung nach dieser Betriebszeit weiter nach oben gewachsen und läßt nur noch einen Streifen von rd. 1 m im Bereich der Filterrohroberkante frei. Die Stärke der Inkrustationen - es handelt sich bei V_2 um den dreimal so stark beanspruchten Brunnen - ist erheblich größer als beim geringer beanspruchten Brunnen V_1 . Nach einer 4-jährigen Betriebszeit sind die Inkrustationen im hochbelasteten Brunnen V_2 so stark geworden, daß eine fotografische Aufnahme nicht mehr möglich war. Der Filterrohrquerschnitt war nämlich so stark zugewachsen, daß die Kamera nicht mehr in den Brunnen eingeführt werden konnte. In V_1 sind inzwischen die Verockerungen noch weiter nach unten gewachsen und auch stärker geworden. Nur ganz wenige Filterrohrschlitze sind im unteren Bereich noch frei.

Die Intensität der Verockerung ist also im Brunnen mit der höheren Leistung entsprechend größer. Das war zu erwarten, da das Nährstoffangebot entsprechend höher ist. Eine allgemeingültige Tendenz der Wachstumsbildung ist aber nicht zu erkennen. Aufgrund der Beobachtung des Durchflußwiderstandes in der Kiesschüttung und in den Filterrohrschlitzen (siehe Abschnitt 2.7.3) verhielten sich die angestiegenen Widerstandswerte dieser beiden Brunnen wie 1:2,8. Das ist fast das gleiche Verhältnis wie das der tatsächlich während der mehrjährigen Versuchszeit geförderten Wassermengen, das 1:2,73 betrug.

Die beiden Brunnen wurden übrigens inzwischen regeneriert und werden seitdem mit gleichhoher Leistung $Q = 120 \text{ m}^3/\text{h}$ gefahren. V_1 wird behandelt, V_2 nicht. Während der Durchflußwiderstand im behandelten Brunnen V_1 etwa in gleicher Höhe wie nach der Regenerierung bleibt, steigt er in V_2 - dem nicht behandelten Brunnen - ganz erheblich an. Diese Ergänzung soll nur noch einmal auf die Richtigkeit des Redoxpotentialgrenzwertes - er wurde für beide Brunnen mit + 100 mV gemessen - sowie auf die gute Wirkung der keimabtötenden Behandlung hinweisen.

- 2.4.72 Frühere Auffassungen besagen, ein Brunnen wachse von außen - im gewachsenen Boden beginnend - nach innen zum Filterrohr hin zu. Die Beobachtungen des Verfassers haben andere Ergebnisse gebracht. Auch Bieske jr. berichtet 1962 von einem über 40 Jahre alten Brunnen, der mittels besonderer Maßnahmen unversehrt geborgen worden ist. Die Verockerung war am stärksten in den Filterrohrschlitzen und reichte nur wenig in den hier natürlich erzeugten Kiesmantel hinein (5).

Die Verockerung muß sich vor allem im Bereich der Filterrohrschlitze und in dem unmittelbar an das Filterrohr angrenzenden Bereich der Kiesschüttung abspielen. Die Begründung liegt in folgenden Beobachtungen:

- 1) Der Eintrittswiderstand, der bei einem neuen Brunnen relativ klein, meist gleich Null ist, steigt infolge der Verockerung lediglich in diesen Bereichen an (siehe Abschnitt 2.7.3).
- 2) Bei Regenerierungsarbeiten (siehe Abschnitt 2.8) wurde der Leistungsanstieg nach den einzelnen Arbeitsabschnitten gemessen. Er läßt Schlüsse auf den Verockerungsprozess zu (Bild 38).

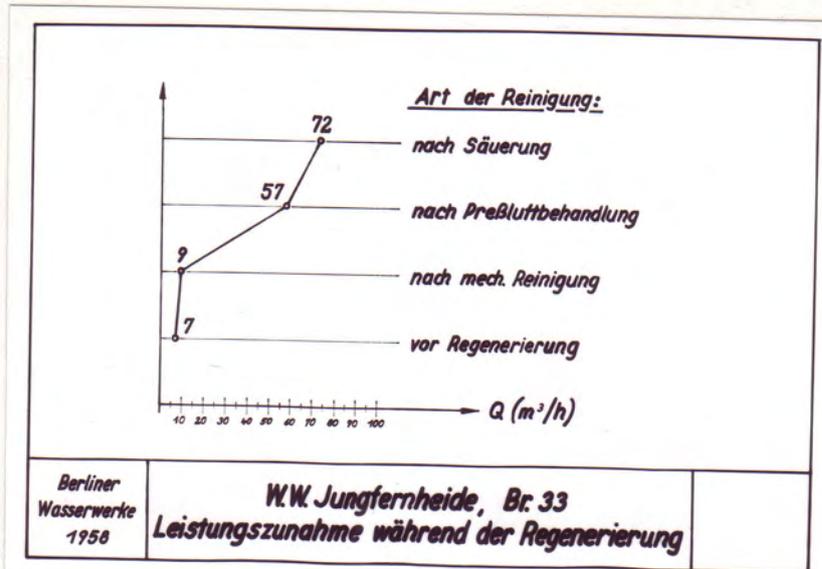


Bild 38

Die Leistung stieg bei dem als Beispiel gewählten Brunnen nach der ersten Reinigungsstufe, dem mechanischen Bürsten, lediglich von $7 \text{ m}^3/\text{h}$ auf $9 \text{ m}^3/\text{h}$ an. Bei diesem Arbeitsvorgang wird das Filterrohr nur grob gereinigt, die Bürsten vermögen die Filterrohrschlitze nur wenig von den Inkrustationen zu befreien.

Den größten Sprung macht die Leistung nach dem 2. Arbeitsgang, bei dem die Filterrohrschlitze und die nähere Umgebung des Filterrohres z.B. mittels schockartiger Preßluftbehandlung von Ablagerungen gesäubert werden. Er beträgt etwa 70 - 75 % des gesamten Leistungsanstieges während der Regenerierung. Das berechtigt zu der Annahme, daß sich die Verockerung hauptsächlich in diesem Bereich abspielt.

- 3) Der Durchflußwiderstand im Bereich der Kiesschüttung und der Filterrohrschlitze kann mittels Peilrohren beobachtet werden. Dasselbe ist möglich am Übergang zwischen Kiesschüttung und gewachsenem Boden. Dazu sind je ein Peilrohr in der äußeren Kiesschüttung und im Boden notwendig. Letzteres muß so nahe wie möglich am Bohrlochmantel stehen (siehe Abschnitt 2.7.3).

Jahrelange Messungen haben ergeben, daß zwar die Differenz der Wasserspiegel zwischen Brunnen und äußerer Kiesschüttung ansteigt, aber nicht zwischen äußerer Kiesschüttung und Boden. Dies ist ein Beweis dafür, daß nennenswerte Ablagerungen in der Nähe des Bohrlochmantels, also am äußeren Rand des Brunnens im allgemeinen nicht erfolgen.

Es gibt allerdings auch Ausnahmen, wo sich im Boden unmittelbar am Rande des Brunnens mit der Zeit eine immer weniger durchlässige Schicht bildet. Der Brunnen wird gezogen, wenn er keine ausreichende Leistung mehr hat, und wird an derselben Stelle, nur mit einem etwas größeren Bohrdurchmesser neu abgeteuft. Dabei wird die etwa 10 - 20 cm starke verdichtete Bodenzone beseitigt. Der neue Brunnen hat, obwohl an der gleichen Stelle niedergebracht, die volle Leistung des ersten Brunnens. Hier handelt es sich aber meist nicht um Verockerungserscheinungen, sondern um eine Verdichtung durch Ablagerung von feinsten Bodenpartikeln.

Mit folgender Methode kann man vielleicht die Beobachtungen unter 1) bis 3) ergänzen:

Jedes Wasser hat zusammen mit dem Untergrund eine gewisse elektrische Leitfähigkeit. Sie ändert sich, wenn Stoffe, wie z.B. Verockerungsprodukte, in den Poren der Kiesschüttung abgelagert werden. Der Verfasser hat versucht, sich diese Tatsache dadurch zunutze zu machen, daß er beim Bau eines Brunnens in die Kiesschüttung mehrere Meßelektroden eingesetzt hat. Der Brunnen wurde für diesen Zweck mit einer dreifach abgestuften Schüttung ausgerüstet, die man normalerweise - wenn sonst keine zwingenden Gründe hierfür vorliegen - nicht verwenden sollte. Als Elektroden kamen Diaphragmakerzen zum Einsatz. Sie haben den Vorteil, daß durch den für die Messung erforderlichen Gleichstrom keine

Elektrolyse entsteht und somit die Meßwerte nicht infolge Bildung von Gasblasen an der Elektrode verfälscht werden. Die Anordnung der Elektroden geht aus den Bildern 39 und 40 hervor.

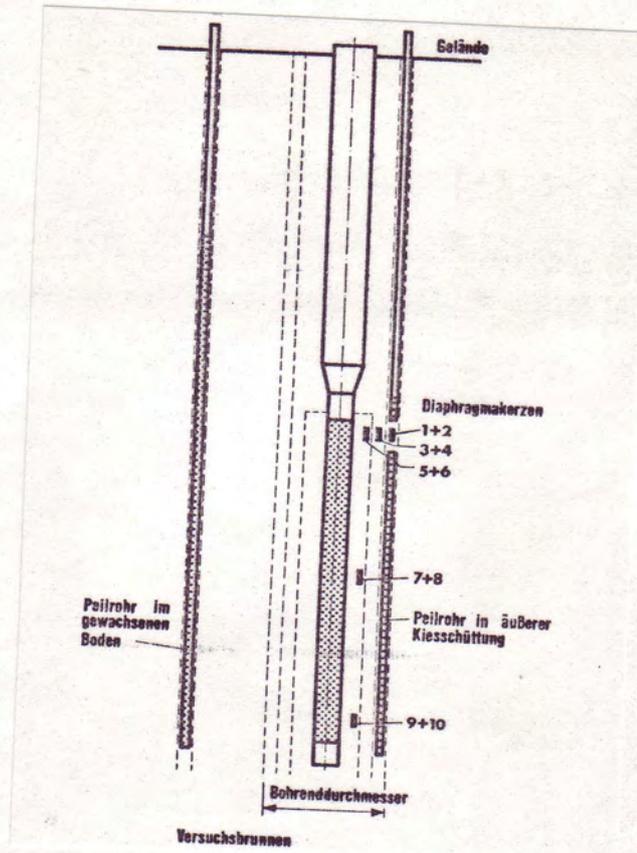


Bild 39

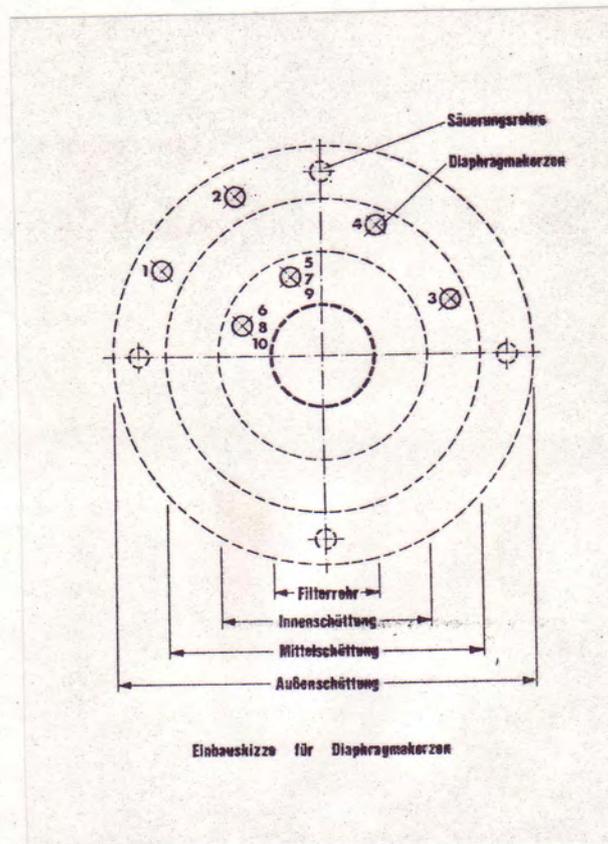


Bild 40

Mit ihnen konnte im Laufe der Betriebszeit eine etwaige Veränderung der Leitfähigkeit auf mehreren Meßstrecken beobachtet werden, und zwar an der Filterrohroberkante in der äußeren Kiesschüttung (Meßstrecke 1 - 2), in der mittleren (3 - 4) und in der inneren (5 - 6). Weitere Meßstrecken (7 - 8; 9 - 10) befinden sich in größeren Tiefen.

Der Verfasser ist sich darüber klar, daß mit dieser Methode keine quantitativen Aussagen über die Intensität der Ablagerungen gemacht werden können, sondern lediglich qualitative. Diese Aussagen sind aber im Zusammenhang mit

anderen Beobachtungen als Ergänzung trotzdem von großem Wert, zumal es sich um Brunnenbereiche handelt, in die mit anderen Hilfsmitteln - zumindest nicht mit wirtschaftlich vertretbaren - kein Einblick zu erhalten ist.

Zur Kontrolle, ob sich die Meßmethode überhaupt für den vorgesehenen Zweck eignet, wird ein Teilstrom des Brunnenwassers durch einen abgeschlossenen Behälter geleitet, der mit dem gleichen Schüttkies gefüllt und mit 2 Diaphragmakernen bestückt ist. Die Wassermenge wurde so gewählt, daß in ihm etwa die gleiche Geschwindigkeit wie in der Brunnenkiesschüttung herrscht.

Da derartige Messungen an Brunnenanlagen erstmalig durchgeführt werden, sind eine Menge "Kinderkrankheiten" zu überwinden. Ob die Methode brauchbare Ergebnisse bringt, muß sich erst zeigen.

2.4.8 Zeitlicher Verlauf der Verockerung

Wenn in der Literatur darüber überhaupt Angaben zu finden sind, dann die, daß der zeitliche Verlauf der Alterungsintensität zunächst sehr steil ansteigt und dann immer flacher wird. (Bild 41)

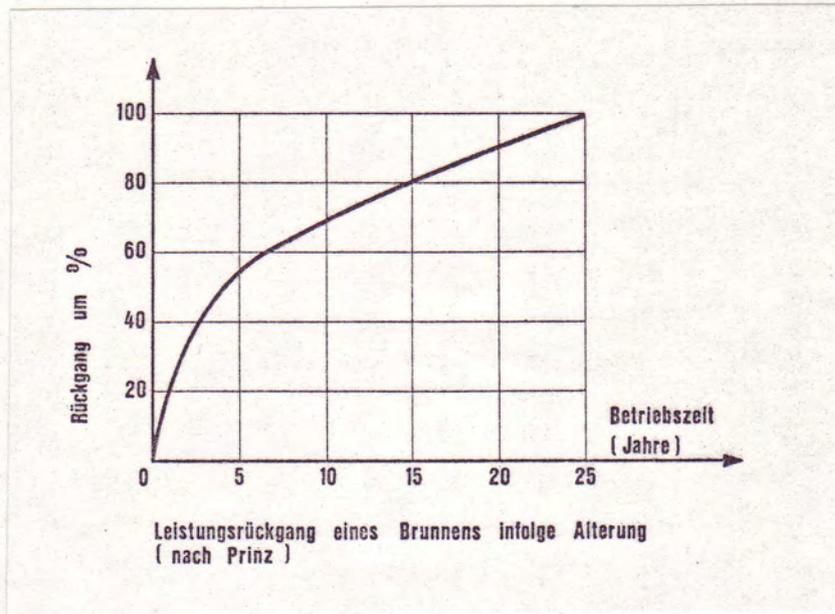


Bild 41

Der Verfasser hat gerade den umgekehrten Verlauf festgestellt, und zwar über den Anstieg des Durchflußwiderstandes in der Kiesschüttung und in den Filterrohrschlitzen, der dort entsteht, wenn dieser Bereich durch Ablagerungen immer mehr verstopft. Da sich der Widerstand nur infolge einer Brunnenalterung ändert, kann man ihn als Kriterium für den Verlauf der Alterung heranziehen.

Am besten ist dies an einer Kurve zu demonstrieren, die den Anstieg des Durchflußwiderstandes über eine Reihe von Betriebsjahren zeigt (Bild 42).

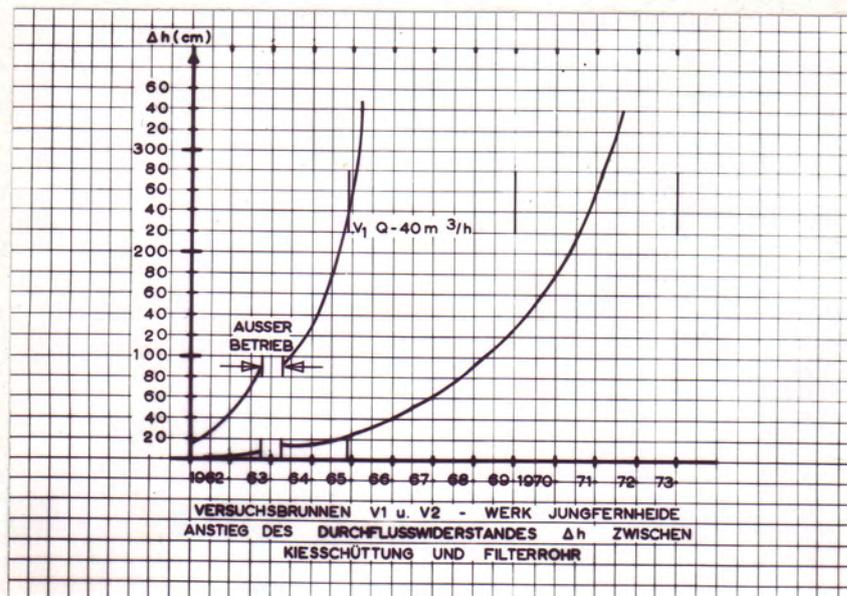


Bild 42

Bei einem neuen Brunnen beträgt der Widerstand meist nur wenige Zentimeter, oft ist er sogar gleich Null. Verockerungsprodukte verengen im Laufe der Zeit in steigendem Maße den Fließquerschnitt, so daß der Durchflußwiderstand mit gleicher - nämlich immer steileren - Tendenz wächst. Nach 4 Betriebsjahren hatte er z.B. bei dem im Bild 42 ausgewerteten Brunnen einen Wert von über 2,5 m erreicht. Im Jahre 1965 wurde der Brunnen übrigens regeneriert. Sein Durchflußwiderstand ging danach fast auf den Wert zurück, den der neue Brunnen hatte.

2.4.9 Verockerung von Dränrohren

Wegen der gleichen Problemstellung ist es zweckmäßig, am Schluß des Abschnittes Verockerung (2.4) quasi als Abrundung kurz auf die Dränung einzugehen (31).

Relativ gut durchlässige Böden zeigen bei ihrer Dränung schon binnen kurzer Zeit, z.T. schon nach ein bis zwei

Jahren, Abflußstörungen durch eisenhaltigen Schlamm. Auch hier spricht man von einer Verockerung, da es die gleichen Vorgänge wie im Brunnenbetrieb sind, die zum Zuwachsen der Dränrohre führen. Nur wird bei der Dränung der Anteil der rein chemischen Verockerung erheblich größer sein, da ausschließlich im oberflächennahen Bereich des Grundwassers gearbeitet wird und die Dränrohre meist nicht voll gefüllt durchflossen werden. Der Sauerstoff der Bodenluft spielt also bei der Dränung, auch noch im Dränrohr, eine außerordentlich große Rolle. Aber selbst ein Einstau der Dränrohre, d.h. also eine Eliminierung des Luftsauerstoffes, hat zu keinem Erfolg geführt, weil auch bei der Dränung der biologische Anteil an der Verockerung sehr groß ist. Das beweist die Tatsache, daß neben 20 - 40 % Eisen im frischen Ockerschlamme noch 25 - 50 % organische Substanz, unter die ja auch die Scheiden der Eisen- und Manganbakterien fallen, festgestellt worden ist. Auch hier verockern Nichtmetalle, wie z.B. Kunststoffdränrohre. Auf Kunststoffrohren hafteten die Inkrustationen aus der Verockerung besonders stark. Auch hier wurde festgestellt, daß bei fließendem Wasser die Fe^{2+} -Konzentrationen sehr viel kleiner sein können, als in der mikrobiologischen Literatur angegeben, um ein massenhaftes Wachstum der Eisen- und Manganbakterien zu ermöglichen. Die Mindestkonzentration wurde mit 0,2 - 0,3mg/l ermittelt, entspricht also in etwa dem von Hässelbarth und Lüdemann angegebenen Wert.

Beim Dränen von nassen Böden treten also die gleichen Probleme wie im Brunnenbetrieb auf, was eigentlich aufgrund der inzwischen gewonnenen Erkenntnisse nicht anders zu erwarten war. Als Abhilfemaßnahme wird im Dränbau u.a. vorgeschlagen, für die Rohrleitungen bakterizides Material zu verwenden. Darüber, ob dieses Material auf die Dauer seine Eigenschaft behält und wirkungsvoll genug ist, liegen bisher keine Angaben vor. Die Methode der Verwendung bakterizider Rohre ist selbstverständlich im Brunnenbau für die Trinkwasserversorgung nicht anwendbar.

2.5. Sonstige Ursachen der Brunnenalterung

Die Ursachen für einen Rückgang der Brunnenleistung brauchen nicht unbedingt immer nur in einer Verstopfung des Brunnens selbst, d.h. der Filterrohre zu liegen. Es tritt gar nicht mal so selten der Fall ein, daß die Filterrohrstrecke völlig in Ordnung ist und daß sich trotzdem eine erhebliche Leistungsminderung einstellt. Man darf deshalb nicht nur den Filterrohren sein Augenmerk schenken, sondern muß auch auf den Zustand der Betriebseinrichtungen eines Brunnens achten. Besonders gefährdet sind folgende Anlagen:

1) Unterwasserpumpe:

Die Einlaufsiebe und das Pumpeninnere verstopfen oft so stark, daß die Pumpe nur noch einen Bruchteil ihrer Nennleistung bringen kann. In den meisten Fällen handelt es sich dabei um eine Massenentwicklung von Eisen- und Manganbakterien und nur in verschwindend geringem Umfang um chemisch ausgefällte Eisen- und Manganverbindungen. Es ist also der gleiche Vorgang wie bei der Verockerung eines Filterrohres. Bemerkenswert ist hierbei, daß sich die Mikroorganismen in Strömungen halten können, die Geschwindigkeiten von mehreren Metern pro Sekunde erreichen. Es wäre fast zu erwarten, daß sie vom Wasser fortgerissen würden.

Bei der "echten" Brunnenalterung stammen die Ausgangsprodukte, die zu Inkrustationen führen, aus dem Grundwasser, in dem sie vorher gelöst vorhanden waren. Zur Verstopfung der Unterwasserpumpen kommt es nun aber nicht nur, wenn das Grundwasser infolge seines Eisengehaltes und seines Redoxpotentials zur Verockerung neigt. Sie kann auch dann eintreten, wenn das geförderte Wasser mit Sicherheit die Voraussetzungen für eine Verockerung nicht erfüllt. In solchen Fällen bleiben die

Filterrohrschlitze völlig sauber. Der Brunnen wäre also voll leistungsfähig, wenn die Unterwasserpumpe nicht zugewachsen wäre. Die Ursache, die derartige Verockerungen mit nachfolgender Verstopfung der Pumpe auslöst, sind dann Korrosionsvorgänge, insbesondere des Pumpenkörpers selbst oder anderer in der Nähe liegender Eisenteile, wie z.B. die Pumpensteigrohre. Aus diesen treten ständig Fe^{2+} -Ionen in das Wasser aus. Die eisernen Einbauteile werden zu sogenannten Donatoren oder Eisenslieferanten für Eisen- und Manganbakterien, die ja vereinzelt in allen Grundwässern vorkommen. Auch wenn sich die Bakterien aufgrund der für sie ungünstigen Wassereigenschaften eigentlich nicht in Massen vermehren könnten, finden sie nun im Bereich der korrodierenden Eisenteile eine ausreichende Nahrung an Fe^{2+} -Ionen. In der Wasseranalyse käme dieser Eisengehalt übrigens kaum zum Vorschein. Den Eisen- und Manganbakterien werden damit zumindest lokal günstige Lebensbedingungen geboten, und es kommt infolge einer nunmehr möglichen Massenentwicklung zu den bekannten Verstopfungen von Unterwasserpumpen (Bilder 43 u. 44).

Bild 43



Bild 44



Dieser Vorgang ist sehr weit verbreitet, da viele Unterwasserpumpen keinen ausreichenden Korrosionsschutz besitzen. Weyer (Rhenag Köln) hat die Pumpen deshalb anfangs kathodengeschützt, indem er die Brunnen mit sogenannten Opferelektroden aus einer Aluminium-Magnesium-Legierung ausrüstete. Sie sind billig und arbeiten ohne Aufgabe eines Fremdstromes als Kathode und verhindern ein Austreten von Fe^{2+} -Ionen aus der Unterwasserpumpe. Dabei "opfern" sie sich allerdings, d.h. sie werden verbraucht und müssen von Zeit zu Zeit erneuert werden. Weyer ging später zu einer anderen Methode über. Er ließ die U-Pumpen mit einem besseren Korrosionsschutz versehen, und zwar anstelle des normalen Anstriches mit einem Einbrennlack überziehen. Seitdem treten keine Verstopfungen mehr auf. Das Brunnenwasser neigte ohnehin nicht zur Verockerung. Opferelektroden sind übrigens auch von Czerwenka (Krefeld) mit Erfolg angewendet worden.

Falls derartige Eisenlieferanten vorhanden sind, können sich die Eisen- und Manganbakterien auch dann in Mas-

sen entwickeln, wenn ein Brunnen n i c h t betrieben wird. Die Bakterien benötigen in diesem Falle nämlich kein an ihnen vorbeifließendes Wasser, das ihnen ständig Nahrung heranschafft; denn sie sind meist schon am oder in der Nähe des Entstehungsortes der Fe^{2+} -Ionen angesiedelt. Eisen- und Manganbakterien vermögen also, auch bei Stillstand eines Brunnens mit der Zeit zu so großen Verstopfungen zu führen, daß in der Pumpe und in ihrem Einlaufsieb kein ausreichender Fließquerschnitt mehr frei bleibt. Die Leistung der Pumpe wird dadurch erheblich gemindert. Die Inkrustationen können sogar so stark sein, daß die Pumpe nach längerem Stillstand nicht mehr "anspringt".

Daß die Verstopfungen solch' großes Ausmaß annehmen, liegt wahrscheinlich - und das gilt ganz allgemein für die Entwicklung von Eisen- und Manganbakterien - an folgendem. Bei den Eisen- und Manganbakterien handelt es sich um autotrophe Mikroorganismen, die den Energiegewinn bei der Eisenoxidation zur Chemosynthese verwenden. Der Energiegewinn ist aber nur klein. Deshalb ist ein relativ großer Eisenumsatz erforderlich, der die starke Fe-Speicherung in den Scheiden der Bakterien und damit die oft in kurzer Zeit entstehenden großen Ablagerungen erklärt. Außerdem nehmen die umgesetzten Eisenverbindungen, die anfangs noch sehr viel Hydratwasser enthalten, ein erheblich größeres Volumen als das ursprüngliche Ausgangsprodukt an. Das Volumen ist etwa 10 - 15mal so groß. Darauf sind auch starke Verstopfungen zurückzuführen in den Fällen, wo visuell kein allzu großer Fe^{2+} -Ionen-Austrag vorzuliegen scheint. Als Beispiel sei ein Trinkwasser-Notbrunnen der Stadt Karlsruhe angeführt. Hier war die U-Pumpe fast völlig verstopft, obwohl die Korrosionserscheinungen an ihr kaum ins Auge fielen. Allerdings spielen in diesem Falle die Pumpensteigrohre die Hauptrolle als Eisenlieferanten. Sie sind aus Stahl und waren

außergewöhnlich stark korrodiert. Die Eisenionen, die aus ihnen in das im Brunnenrohr stehende Wasser austreten, sinken ab und gelangen auch in den Bereich der U-Pumpe. Da sich dort infolge des zeitweiligen Brunnenbetriebes wahrscheinlich ohnehin Eisen- und Manganbakterien in größeren Mengen angesammelt hatten, waren die absinkenden Eisen-Ionen ein willkommener Nährstoff und Anlaß zur Massenentwicklung. Auf die daraus zu ziehenden Konsequenzen wird im Abschnitt 2.9.2 eingegangen.

- 2) Das für die Unterwasserpumpen unter 1) Gesagte gilt analog für andere betriebliche Brunneneinrichtungen. Dazu gehören Pumpensteigrohre, Saugrohre, Wasserzähler und Brunnenkopf (Bilder 45 und 46). Alle diese, nicht unmittelbar zum Brunnen - als Fassungsanlage - gehörenden Teile können ebenfalls durch Inkrustationen die Brunnenleistung nachteilig beeinflussen. Die Inkrustationen sind nachweislich in der Hauptsache biologischen Ursprunges. Die Vorgänge sind die gleichen wie unter 1) bzw. ergeben sich aus der Neigung des Wassers zur Verockerung.



Bild 45



Bild 46

- 3) Eisenlieferanten sind also immer Teile eines Brunnens und seiner betrieblichen Einrichtungen, deren Werkstoffe falsch gewählt oder unzureichend gegen Korrosion geschützt sind. Donatoren können auch beim Bau eines Brunnens infolge Bequemlichkeit oder Unachtsamkeit in den Brunnen gelangen bzw. in ihm verbleiben. Dazu gehören vor allem ungeschützte stählerne Zentrierschellen oder Schrauben, Muttern und Niete, die beim Ziehen der Bohrrohre meist nicht aufgefangen werden und deshalb in die Kiesschüttung fallen.

2.6. E i n f l u ß d e r B e t r i e b s w e i s e

Über den Einfluß der Betriebsweise auf die Brunnenalterung findet man in der Literatur zwar wenige, aber trotzdem recht widersprüchliche Auffassungen. Als Beispiel sei zunächst ein Aufsatz von Pengel und Bieske erwähnt, in dem sie behaupten, daß eine Verockerung auch in Brunnen stattfindet, die nicht im Betrieb sind (45). Ein Hinauszögern der Brunnenalterung durch vorübergehende Nichtbe-

nutzung wäre also nicht möglich, abgesehen von der Sinnlosigkeit einer derartigen Maßnahme. Demgegenüber ist Wiegand der Meinung, daß die Verockerung vor allem bei intermittierendem Betrieb eintritt (59). Schneider steht wiederum auf dem Standpunkt, daß die Betriebsweise keine Rolle spielt (53).

Aufgrund seiner rd. 20-jährigen Erfahrung und aufgrund der in dieser Zeit gewonnenen Erkenntnisse auf dem Gebiet der Brunnenalterung kommt der Verfasser zu dem Schluß, daß die Betriebsweise folgenden Einfluß auf die Brunnenalterung hat.

- 1) Die Meinung, daß auch stillstehende Brunnen "echt" verockern, entspricht nicht den Tatsachen, solange es bei der üblichen Definition der "echten" Verockerung bleibt, die besagt, daß es sich dabei um die Ablagerung von unlöslichen Eisen- und Manganverbindungen handelt, die im natürlichen Grundwasserstrom noch in ihrer löslichen Form vorhanden waren. Diese Verockerung, die nachgewiesenermaßen hauptsächlich auf biologischen Ursachen beruht, kann bei einem stillstehenden Brunnen schon deshalb nicht auftreten, weil dann die Nährstoffe den Eisen- und Manganbakterien - genau wie im natürlichen Grundwasserstrom - nicht in genügender Menge für eine Massenentwicklung dargeboten werden.

Folgende Beispiele aus der Praxis beweisen das.

Durch Zufall wurde 1958 bei Kontrollarbeiten im Verband einer Galerie ein Brunnen gefunden, der im Jahre 1929 gebohrt und seit dieser Zeit nicht betrieben worden war. Es handelte sich um einen Brunnen mit gelochten, gewebeüberspannten kupfernen Filterrohren, um eine Brunnenbauweise also, die bekanntlich sehr schnell zu Verstopfungen der Filterrohre neigt. Ins-

gesamt 7 Brunnen dieser Bauart und gleichen Baujahres standen dicht nebeneinander in demselben Grundwasserhorizont. Sie wurden zunächst fotografisch aufgenommen. Die ständig betriebenen Brunnen wiesen starke Inkrustationen auf, der seit rd. 30 Jahren stillstehende Brunnen war dagegen völlig sauber. Diese Tatsache allein wäre jedoch noch kein ausreichender Beweis; denn der Einspruch, die Unterwasserkamera könne ja nicht einen evtl. verockerten Bereich außerhalb des Filterrohres erfassen, lag auf der Hand. Daß aber vom Zustand des Filterrohrinneren meist auch auf das Ausmaß der Leistungsminderung infolge Verockerung geschlossen werden kann, bestätigte das anschließende Leistungspumpen. Die Leistung des nicht-betriebenen Brunnens betrug nämlich immer noch $60 \text{ m}^3/\text{h}$ - eine sehr gute Leistung für einen Brunnen dieser Bauweise und diesen Alters, der dazu noch in fein- bis mittelsandigen Schichten stand. Die Leistung der übrigen 6 Brunnen lag unter gleichen Voraussetzungen, d.h. z.B. bei gleicher Absenkung zwischen 2 und $15 \text{ m}^3/\text{h}$. Das spricht eindeutig gegen die Auffassung, daß eine Verockerung auch bei Stillstand eines Brunnens eintritt. Blieb nur noch der Einwand, daß das Wasser dieses Brunnens möglicherweise nicht die Bedingungen für eine Massenentwicklung von Eisen- und Manganbakterien erfüllen könnte, der auch nicht dadurch zu entkräften ist, daß alle 7 Brunnen in kurzen Abständen nebeneinander im gleichen Grundwasser niedergebracht worden waren. Es ist ja keine Seltenheit, daß mitten in einer Galerie einzelne Brunnen existieren, die hinsichtlich ihrer Wasseranalyse gegenüber den anderen völlige "Ausrutscher" sind. Das Wasser dieses Brunnens hätte vielleicht als einziges die Voraussetzungen für eine Verockerung nicht zu erfüllen brauchen. Um falsche Schlußfolgerungen zu vermeiden, wurde der Brunnen etwa 2 Jahre später

- nach seiner Inbetriebnahme - wieder fotografiert.
Die Aufnahmen zeigten eine beginnende Verockerung.

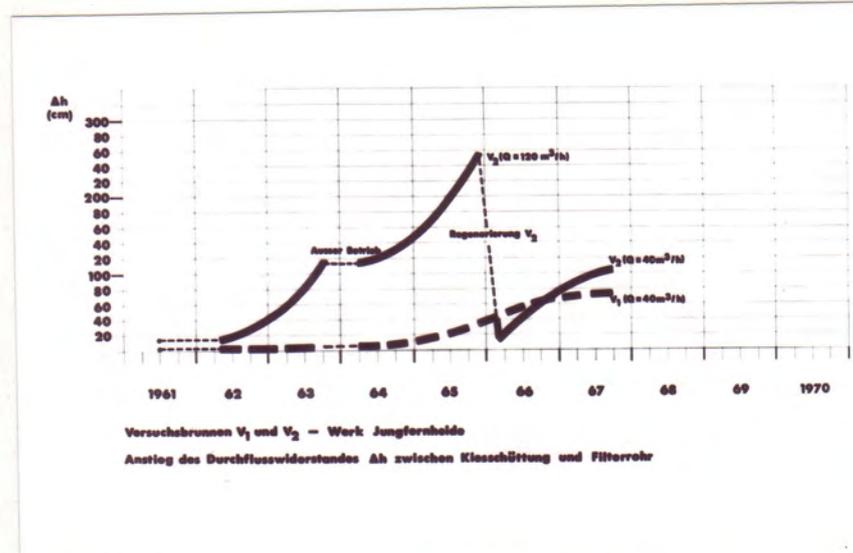


Bild 47

Dafür, daß in einem nicht-betriebenen Brunnen die Verockerung zum Stillstand kommt, spricht auch die langjährige Beobachtung des Durchflußwiderstandes in einem Versuchsbrunnen, der im Bild 47 graphisch aufgetragen ist. Dieser Brunnen mußte etwa 2 Jahre nach seiner Inbetriebnahme für ein halbes Jahr außer Betrieb genommen werden. Der Anstieg der Δh -Kurve, auf die im Abschnitt 2.7.3 näher eingegangen wird, setzt sich zum Zeitpunkt der Außerbetriebnahme nicht fort. Δh wächst während der Betriebsunterbrechung nicht weiter. Erst nach der Wiederinbetriebnahme geht der Widerstand in der vorher zu erkennenden Gesetzmäßigkeit weiter in die Höhe.

- 2) Vom i n t e r m i t t i e r e n d e n Betrieb wird behauptet, daß er die Brunnenalterung begünstige, insbesondere deshalb, weil der Absenkungstrichter in dauerndem Wechsel neu gebildet und wieder aufgefüllt

wird. Das Grundwasser könne sich beim Wiederanstieg jedesmal mit der Bodenluft mischen und dabei Sauerstoff aufnehmen. Der Sauerstoff soll dann zur chemischen Verockerung führen.

Der Verfasser hat jedoch die Erfahrung gemacht, daß gerade sogenannte Dauerläufer - dies können z.B. wegen der Verkeimungsgefahr bei längerem Stagnieren des Wassers in einer Rohrleitung Endbrunnen einer Galerie sein - schneller in der Leistung nachlassen als intermittierend betriebene Brunnen. Das hat allerdings nichts mit Verockerung zu tun, sondern wird folgende Ursache haben. Bei einem ständig beaufschlagten Brunnen stellt sich im Untergrund, in der Kiesschüttung und in den Filterrohrschlitzen eine gleichmäßige Wassergeschwindigkeit ohne nennenswerte Störungen ein. Beim intermittierenden Betrieb dagegen wird ein Brunnen bei jeder Inbetriebnahme wieder "angerissen", sofern die Brunnen nicht ferngesteuert gegen einen geschlossenen, sich allmählich öffnenden Schieber angefahren werden. Letzteres stellt aber die große Ausnahme dar. Es ist nun ohne weiteres denkbar, daß bei diesem "Anreißen" nicht allzu festsitzende Inkrustationen gelockert und abgelöst werden. Das gilt in noch größerem Maße für Bestandteile aus dem Grundwasserleiter, wie z.B. Tonpartikel sowie Staub- und Feinsande, die sich bei Dauerbetrieb im Bereich der Bohrlochwand oder in der Kiesschüttung eher ablagern und dort zu Verstopfungen führen als beim intermittierenden Betrieb. Auch diese werden wahrscheinlich beim "Anreißen" immer wieder entfernt.

2.7. Methoden zur Feststellung der Brunnenalterung

- 2.7.1 Eine ständige Sandführung im Brunnenwasser kann eine allmähliche Versandung der Filterrohrstrecke und, falls diese nicht rechtzeitig erkannt wird, eines Tages einen erheblichen Rückgang der Brunnenleistung zur Folge haben.

Außerdem sind damit meistens auch Schäden in Pumpen, Wasserzählern, Rohrleitungen usw. verbunden. Eine turnusmäßige Kontrolle der Brunnen tiefe mittels Lotung und des geförderten Wassers auf Sandfreiheit ist deshalb erforderlich. Über die Definition des Begriffes Sandfreiheit, d.h. über die zulässige Sandmenge pro Wassereinheit, ist man sich heute in Fachkreisen noch nicht einig. Je nach Auftraggeber schwanken die Werte sehr stark.

Der DVGW hat sich dieses Themas jetzt in seinem Ausschuß "Wassergewinnung und Wasseranreicherung" angenommen. Eine schnelle Klärung dieses Problems wird allerdings aufgrund seiner Schwierigkeit nicht zu erwarten sein.

Wird eine Sandführung festgestellt, kann die Lokalisierung der Eintrittsstelle durch ein abschnittsweises Abpumpen der Filterstrecke mittels einer Kammer erfolgen.

Eine Sandführung oder Versandung muß übrigens nicht unbedingt auf eine falsche Dimensionierung der Kiesschüttung zurückzuführen sein. Der Grund kann auch in ungeeignetem Material für die Brunnenrohre liegen, in einem Material, das z.B. zu schwach für den örtlichen Gebirgsdruck oder das nicht korrosionsfest ist und das deshalb mit der Zeit zu Bruch geht.

Manchmal reicht schon eine Deformation der Brunnenrohre infolge unvorsichtigen Einbaues aus, bei der die Filterrohre so stark beschädigt werden, daß sie zwar für die Gewährleistungsfrist noch eine sandfreie Wasserförderung ermöglichen, mit der Zeit aber lokal zu Bruch gehen und ständige Sandeinbrüche ermöglichen. Es empfiehlt sich daher, bei der Abnahme eines neuen Brunnens seine Kalibrierung über die gesamte Tiefe zu überprüfen.

2.7.2 Unterwasserkamera und Unterwasserfernsehkamera

Eine gute Beobachtungsmöglichkeit bieten Unterwasserkamera und Unterwasserfernsehkamera. Das gilt selbstverständlich nur für die Vorgänge, die sich im Brunneninneren, vor allem im Filterrohr und seinen Schlitzen abspielen. Was in der Kiesschüttung vor sich geht, kann damit natürlich nicht festgestellt werden. Beide Geräte haben Vor- und Nachteile. Sie sollen an dieser Stelle nicht diskutiert werden. Die Wahl, welches Gerät am zweckmäßigsten ist, hängt jeweils von dem ab, was untersucht bzw. beobachtet werden soll.

Mit welcher Präzision Mängel oder Schäden z.B. mit einer Unterwasserkamera aufgespürt werden können, demonstrieren die Bilder 48 und 49, die deformierte Filterrohre zeigen. In den aufgerissenen Schlitzen sind deutlich die Kieskörner der Schüttung zu erkennen.

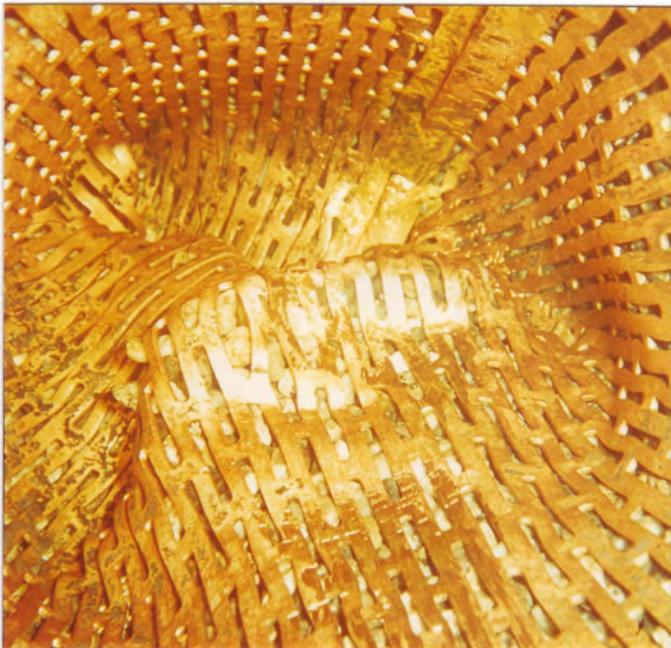


Bild 48



Bild 49

und

Mit einer Unterwasserkamera ist sogar die S a n d f ü h -
r u n g eines Brunnens festzustellen und zu lokalisieren.
Als Vororientierung für die Einkreisung der Schadensstelle
dient ein Trübungsmesser, der vor dem Kameragehäuse ein-
gebaut ist und Sand im Wasser zur Kontrollstelle signali-
siert. Die fotografische Untersuchung kann danach auf die
vermutliche Schadensstelle und ihre Umgebung konzentriert
werden. Im Bild 50 sind deutlich die Sandkörner zu sehen,
die in einem Vertikalbrunnen vom geförderten Wasser mit
nach oben - der Kamera entgegen - transportiert werden.

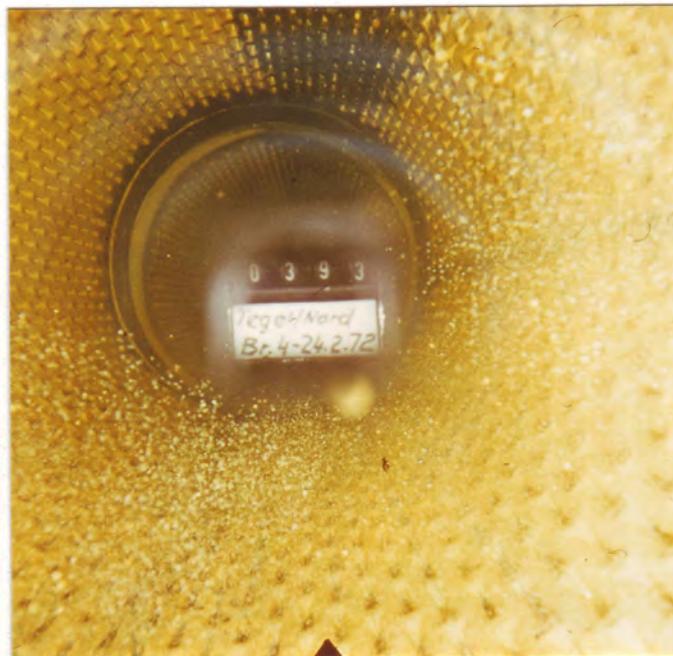


Bild 50

Auch im Horizontalbrunnen sind Sandeinbrüche aufzuspüren.
Im Bild 51 ist z.B. Sand zu erkennen, der durch die
Schlitze des Filterrohrscheitels eines Horizontalstranges
rieselt. Bild 52 zeigt größere Sandablagerungen in einem
solchen Strang, die daraus entstehen können.

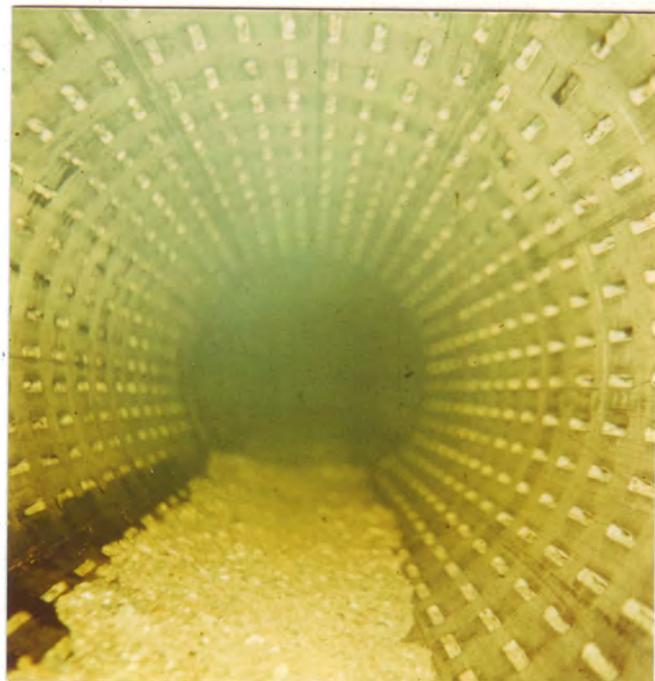
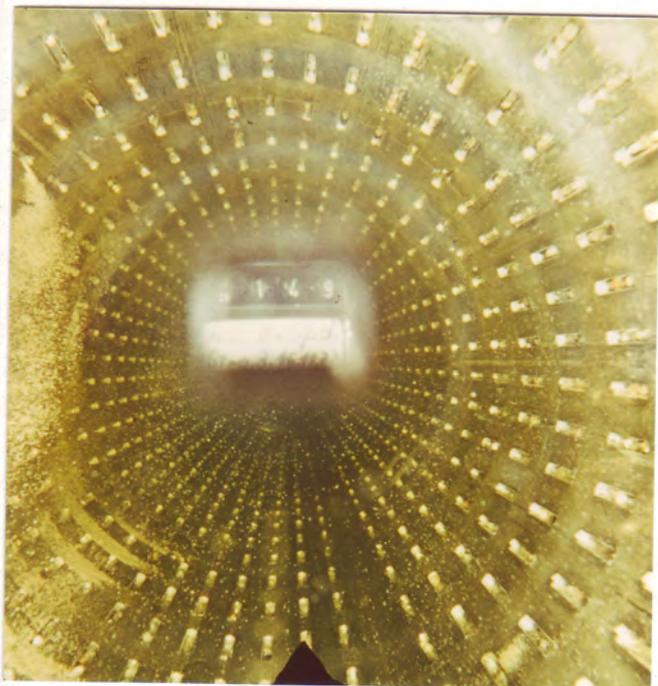


Bild 51

und

Bild 52

Auch die fotografische Beobachtung des Verocke-
rungsprozesses bringt wichtige Erkenntnisse über
Entstehung, Fortschritt und Formen der Ablagerungen. Im
Bild 53 handelt es sich um einen Vertikalbrunnen, der nur
einseitig verockert.

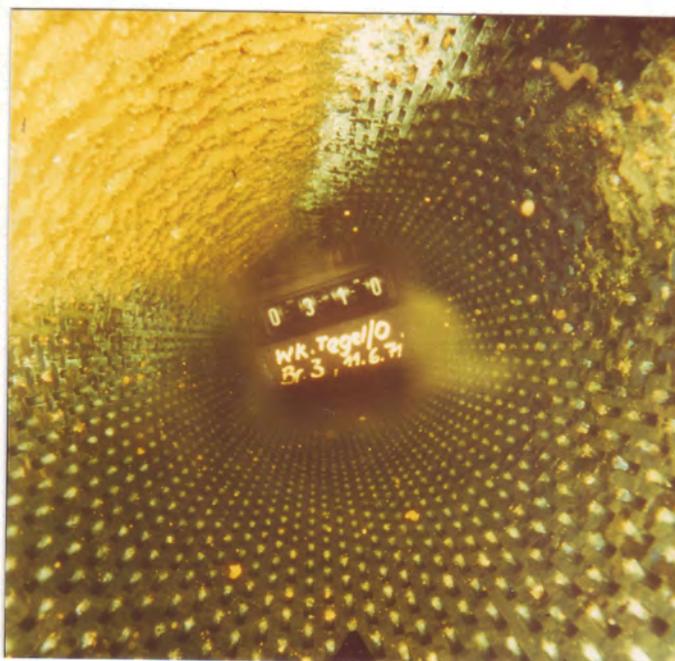


Bild 53

Da die Kamera mit einem Kreisel ausgerüstet ist, kann jede Aufnahme nach Norden ausgerichtet werden. Die Spitze des kleinen Dreieckes zeigt nach Norden. So ist es möglich, bei unterschiedlicher Stärke der Inkrustationen die zugehörigen Himmelsrichtungen festzulegen.

Dieses Bild gibt übrigens eine Antwort auf den Zweifel, der manchmal an dem Grenzwert des Redoxpotentials aufkommt, wenn Brunnen, die aufgrund eines negativen Wertes eigentlich gar nicht verockern dürften, mit der Zeit dann doch in ihrer Leistung nachlassen. Das liegt ganz einfach daran, daß der Anteil des zur Verockerung neigenden Wassers, das im vorliegenden Beispiel nur innerhalb eines begrenzten Sektors, nämlich von Süden auf den Brunnen zufließt, nicht so groß ist, um das Redoxpotential des Gesamtwassers in den Bereich zu verlagern, der für eine Massenentwicklung von Eisen- und Manganbakterien geeignet wäre. Die Aufnahme wurde in einem Brunnen gemacht, der an einem Seeufer liegt (Bild 54). Der Brunnen fördert außer dem landseitigen Grundwasser, das oft noch als "echtes" Grundwasser bezeichnet wird, einen gewissen Anteil an Uferfiltrat. Verockert ist hier der landseitige Bereich. Von dort her kommt also das Wasser, das den Eisen- und Manganbakterien gute Lebensbedingungen bietet. Bei Bild 53 zeigt die Spitze des Dreiecks ausnahmsweise nach Süden.

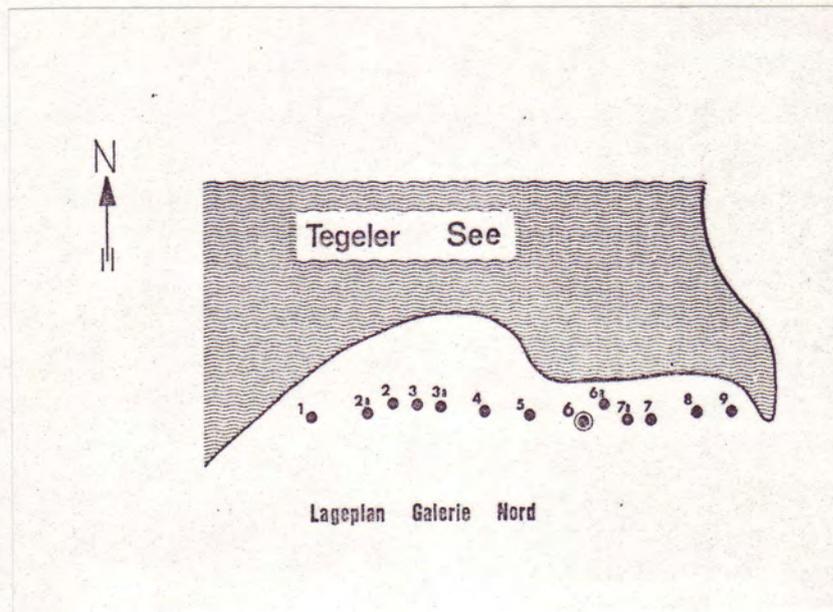


Bild 54

In Horizontalfiltersträngen ist eine Richtungsorientierung ebenfalls von Wichtigkeit. Hier spielt weniger die Himmelsrichtung eine Rolle als vielmehr die Festlegung der Vertikalen, also eine Orientierung nach Filterrohrscheitel bzw. Filterrohrsohle. Das ist mit der Unterwasserkamera ebenfalls möglich. Bild 55 ist in einem solchen Strang aufgenommen. Die Spitze des Dreieckes zeigt zum Filterrohrscheitel.

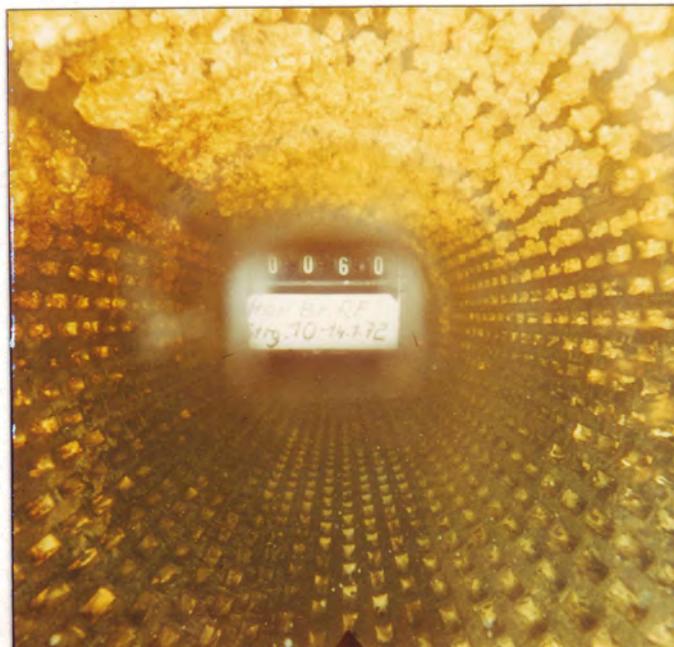


Bild 55

Unterwasserkamera und Unterwasserfernsehkamera sind relativ teuer. Jeder Brunnenbetreiber kann sie sich deshalb nicht anschaffen. Nur größere Wasserwerke werden dazu in der Lage sein. Dort, wo eine große Anzahl von Brunnen vorhanden ist, lohnt sich die Anschaffung.

- 2.7.3 Außer der fotografischen Kontrolle gibt es noch andere, billigere Methoden.

Verstopfungen infolge Versandung und Inkrustationen können im Bereich der Bohrlochwand, in der Kiesschüttung und in den Filterrohrschlitzen auftreten. Sie führen dort zu Verengungen des Durchflußquerschnittes und damit zu steigenden Durchflußwiderständen. Letztere vermag man durch Differenzenbildung von Wasserspiegelmessungen zu ermitteln. Brunnen sollten deshalb mindestens mit 2 Meßstellen ausgerüstet werden. Bei Hochleistungsbrunnen sind sogar 3 Stellen zweckmäßig.

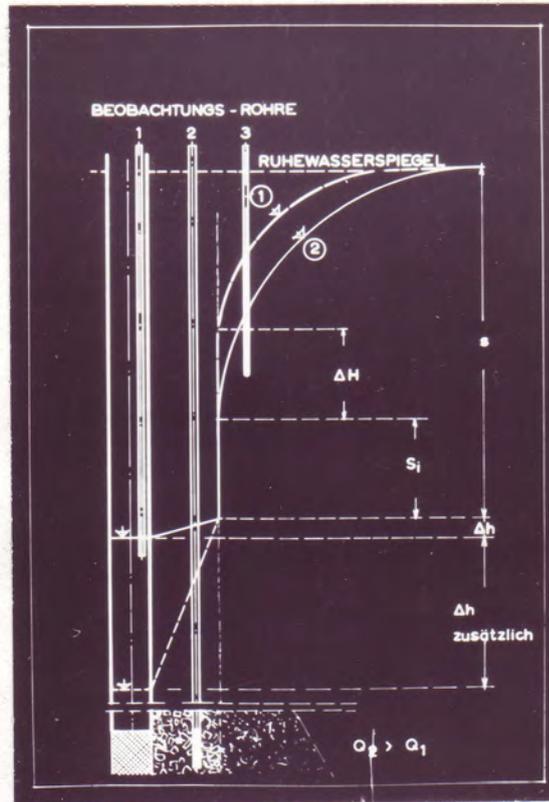


Bild 56

Die erste Stelle ist das Brunnenrohr selbst - im Bild 56 bezeichnet mit 1 - , die zweite in einem Peilrohr in der äußeren Kiesschüttung (2). Wenn dieses Rohr nahe genug am gewachsenen Boden steht, kann der Druckverlust im größten Teil der Kiesschüttung und in den Filterrohrschlitzen aus der Wasserspiegeldifferenz dieser beiden Rohre bestimmt und ständig beobachtet werden. Falls noch ein drittes Rohr 3 dicht neben dem Brunnen im gewachsenen Boden, und zwar so nahe wie möglich an der äußeren Kiesschüttung eingebaut ist, kann auch ein steigender Druckverlust am Übergang zwischen gewachsenem Boden und Kiesschüttung rechtzeitig erkannt werden. Bei einem neuen

Brunnen ist der Druckverlust Δh in der Regel nur sehr gering, oft sogar gleich Null. Wenn ein Brunnen mit der Zeit verockert, die Poren der Kiesschüttung und die Filterrohrschlitze infolge Inkrustationen also zuwachsen, kommt zu diesem Δh ein Δh -zusätzlich, das erhebliche Werte annehmen kann. 2 1/2 und mehr sind schon gemessen worden.

ΔH tritt bei Verdichtungen am Übergang zwischen Kiesschüttung und Boden auf. Vorgänge, die das bewirken, sind meist Ablagerungen von Feinstsand oder anderen Bodenpartikeln. Beobachtungsröhre 3 ist bei Trinkwasser-notbrunnen nicht erforderlich, ja sogar nicht einmal zweckmäßig, da es meist außerhalb des Brunnenschachtes stehen müßte. Es wäre also eher eine Gefahrenquelle als ein Nutzen für den Brunnen.

Der Vollständigkeit halber sei hier darauf hingewiesen, daß Verdichtungen an der Bohrlochwand bereits beim Bohren eines Brunnens entstehen können. Die Größe dieses "künstlich" geschaffenen Durchflußwiderstandes kann allein durch die Messung der Wasserspiegel in den Peilrohren nicht bestimmt werden. Dazu gehören zum Teil recht umfangreiche Berechnungen. Für die dann anzuwendenden Methoden wird in Kürze ein vom DVGW aufgestelltes Arbeitsblatt erscheinen. Es soll vor allem ein Hilfsmittel für die Entscheidung sein, ob ein Brunnen einer Hochleistungsentsandung unterzogen werden soll oder nicht. Eine Hochleistungsentsandung, deren Zweck die Beseitigung "künstlich" überhöhter Durchflußwiderstände ist, kann recht kostspielig werden. In vielen Fällen ist es deshalb zweckmäßig, vorher zu untersuchen, ob eine solche Hochleistungsentsandung eine spürbare Verbesserung der Brunnenleistung bringen wird.

Mit "Si" wird im Bild 56 übrigens die aus der Brunnenhydraulik bekannte Sickerstrecke bezeichnet. Sie ist bei Brunnen im ungespannten Grundwasser mit freier Oberfläche

hydraulisch bedingt und deshalb unumgänglich. Eine konstante Größe, wie Ehrenberger bei Aufstellung seiner Gleichung für die Sickerstrecke annahm, ist sie allerdings nicht, sondern jeweils von den geometrischen Größen des Brunnens abhängig.

Bei Horizontalbrunnen ist eine analoge Überwachung der Brunnenalterung möglich, jedoch nicht so eindeutig. Für die Praxis brauchbare Anhaltswerte liefert aber ein vom Verfasser schon mehrmals angewendetes Verfahren. Hier werden für die Beobachtung der Wasserspiegel der Brunnen-schacht und Grundwassermeßstellen, die außerhalb der Horizontalstrangspitzen im Grundwasserleiter stehen, herangezogen. Diese Methode ist natürlich nicht so genau, weil zwischen den Beobachtungsrohren und Brunnen-schacht ein viel größerer Bereich liegt, in dem der Untergrund verstopfen könnte. Trotzdem ist die Methode recht brauchbar, aber nur deshalb, weil sich eben die Brunnenalterung hauptsächlich im Bereich der Filterrohre und in den Filterrohrschlitzen abspielt.

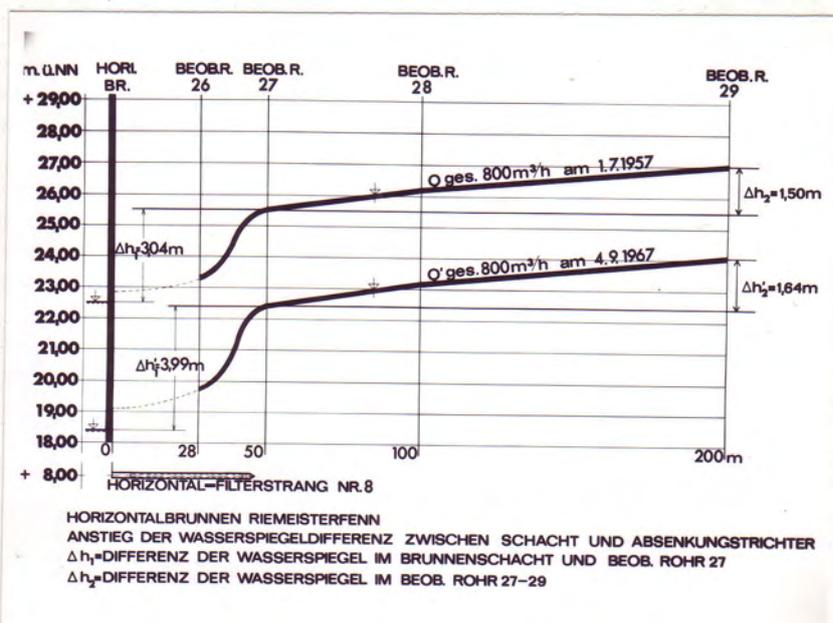


Bild 57

Folgendes Beispiel aus der Praxis beweist das. In Bild 57 ist der Verlauf der Absenkungskurve eines Horizontalbrunnens dargestellt. Die obere Kurve wurde kurz nach seiner Inbetriebnahme, die untere bei gleicher Leistung nach einer Betriebszeit von rd. 10 Jahren gemessen. Außerhalb der Horizontalfilterstränge liegt die Absenkungskurve nach diesen 10 Jahren zwar nicht mehr auf gleicher Höhe, hat aber hydraulisch fast noch den gleichen Verlauf, d.h. die Wasserspiegeldifferenzen zwischen den Beobachtungsröhren sind in etwa gleich groß geblieben. Deutlich angestiegen ist in den 10 Betriebsjahren jedoch die Wasserspiegeldifferenz im Bereich der Filterstränge. Der Durchflußwiderstand ist um 95 cm angewachsen. Die tiefere Lage in 1967 hat nichts mit einer Brunnenalterung zu tun. Der Brunnen hat sich mit der Zeit erst sein Einzugsgebiet und damit seinen Absenkungstrichter schaffen müssen. Der Anstieg der Wasserspiegeldifferenz war tatsächlich in vollem Umfang die Folge einer Verockerung. Sie ging nämlich nach der Regenerierung dieses Brunnens um rd. 1 m, d.h. praktisch um 100 % auf den Ausgangswert zurück. Der prozentuale Rückgang ist ein Kriterium für die mehr oder weniger gute Wirkung von Regenerierungsarbeiten.

Für die Praxis ergibt sich daraus bei Brunnen, die zur Alterung neigen, die logische Folgerung, den Anstieg des Durchflußwiderstandes ständig zu beobachten und für jeden Brunnen graphisch aufzutragen. In welchen Zeitabständen die Messungen - bei gleicher Brunnenleistung - durchzuführen sind, muß von Fall zu Fall entschieden werden. Im allgemeinen werden 3 bis 4 Messungen pro Jahr ausreichen. Der Sinn ist der, rechtzeitig zu erkennen, ob ein Brunnen verockert und in welchem Maße. Denn der Erfolg einer späteren Regenerierung ist davon abhängig, daß sie nicht zu spät vorgenommen wird, weil dann die Filterrohrschlitze und die Poren der Kiesschüttung schon zu stark zugewachsen und die Inkrustationen infolge Abgabe ihres Hydratwassers bereits zu sehr verhärtet sind.

Das Ausmaß der Verstopfung ist aus dem Anwachsen des Durchflußwiderstandes abzulesen. Bild 47 zeigt ein derartiges Diagramm für einen Vertikalbrunnen. Beim neuen Brunnen ist Δh noch sehr klein, meist sogar gleich Null, und wächst zunächst langsam. Der Anstieg wird dann steiler. Nach etwa 2 Jahren mußte der Brunnen aus betrieblichen Gründen vorübergehend stillgelegt werden. Das Δh betrug zu dieser Zeit rd. 110 cm. Der Brunnen blieb 6 Monate außer Betrieb. In dieser Zeit hatte sich Δh n i c h t verändert. Wie bereits in Abschnitt 2.6 erwähnt wurde, ist dies ein Zeichen dafür, daß stillstehende Brunnen normalerweise nicht verockern, falls keine korrodierenden Einbaumaterialien als Lieferanten für Eisenionen (siehe 2.5) im Brunnen vorhanden sind.

Mit der gleichen Tendenz - nämlich immer steiler werdend - verläuft die Kurve nach der Wiederinbetriebnahme weiter. Nach 5 Jahren Gesamtbetriebszeit war Δh auf 2,50 m angestiegen. Der Brunnen mußte regeneriert werden.

Bei Horizontalbrunnen käme man für analoge Beobachtungen im günstigsten Falle mit einer Grundwassermeßstelle dicht außerhalb der Filterstrangspitzen aus. Nämlich dann, wenn der Brunnen in einem völlig homogenen Grundwasserleiter steht, von allen Seiten gleichmäßig angeströmt wird und alle Filterstränge gleichmäßig schnell und gleich stark verockern. Nur in diesem Fall kann man aus den Wasserspiegelbeobachtungen in einer einzigen Meßstelle und im Brunnen schacht auf die Alterung aller Filterstränge schließen. Da diese Voraussetzungen in der Praxis wohl nie gegeben sind, muß man also mehrere Meßstellen vorsehen.

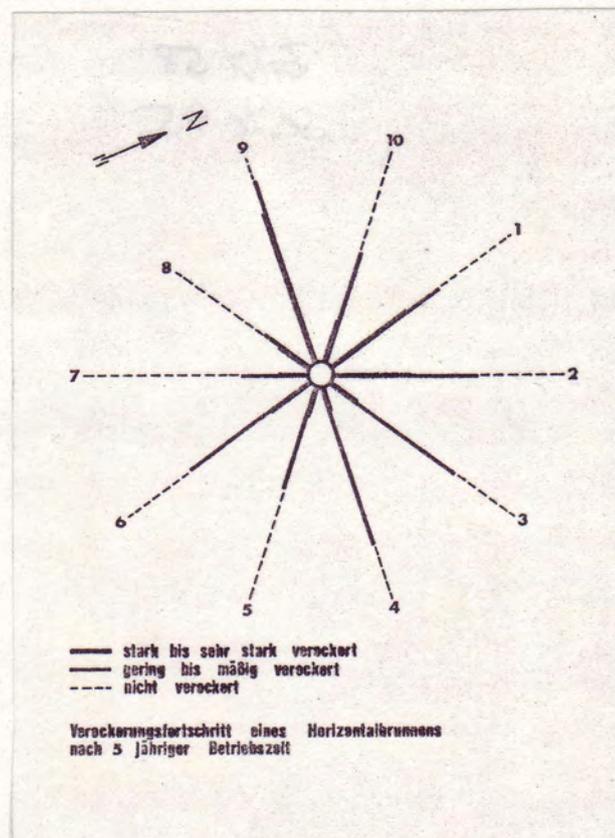


Bild 58

Wie unterschiedlich die Filterstränge eines Horizontalbrunnens altern, sei an einem Beispiel aus der Praxis

demonstriert. Im Bild 58 ist der Verockerungsfortschritt aller 10 Filterstränge eines Brunnens skizziert, wie er mit fotografischen Aufnahmen festgestellt wurde.

2.8. R e g e n e r i e r u n g v o n B r u n n e n

Eine Regenerierung hat den Sinn, die Inkrustationen in den Filterrohrschlitzen und in den Poren der Kiesschüttung zu entfernen und dadurch die Leistung eines Brunnens möglichst wieder auf den Neuwert zu bringen. Sie darf jedoch nicht zu spät, d.h. erst dann durchgeführt werden, wenn die Inkrustationen schon zu umfangreich und zu sehr verhärtet sind. Man sollte deshalb eine der unter 2.7.2 und 2.7.3 genannten Methoden zur Überwachung des Verockerungsfortschrittes anwenden. Besonders dann, wenn eine turnusmäßige Behandlung mit keimabtötenden Mitteln lt. Abschnitt 2.4.5 nicht erfolgt.

2.8.1 Obwohl mit der auf Seite 40 (2.4.5) beschriebenen Methode die Verockerung von Brunnen in vielen Fällen verhindert, zumindest aber sehr stark gebremst werden kann, wäre es vermessen, heute schon von dieser Behandlung, die der Verfasser vor ca. 15 Jahren eingeführt hat, zu behaupten, daß Brunnen in Zukunft überhaupt nicht mehr verockern werden. Dazu sind die Probleme der Brunnenalterung zu vielgestaltig.

Es wäre z.B. denkbar, daß die Eisen- und Manganbakterien nach einer gewissen Zeit "resistent" gegen die verwendeten keimabtötenden Mittel werden könnten. Hier würde es sich nicht um eine Resistenz von Bakterien im Sinne der Medizin, wie z.B. gegen Penicillin, handeln. Penicillin stört den S t o f f w e c h s e l der Bakterien und führt dadurch zur Abtötung. Beim Einsatz von chlorhaltigen Präparaten im Brunnenbetrieb kommt es dagegen zur O x i d a t i o n , d.h. zur "Verbrennung" der Eisen- und Manganbakterien.

Weiterhin sei an Brunnen erinnert, deren Gesamtwasser keine Neigung zur Verockerung erkennen läßt und deshalb auch keine Veranlassung zu ihrer Behandlung gibt. Die Filterrohre wachsen dann aber trotzdem unerwarteterweise zum Teil zu, weil an einigen Stellen Wasser in den Brunnen eintritt, das im Gegensatz zum Gesamtwasser aufgrund seines anderen Redoxpotentials doch zur Verockerung neigt. Da diese Stellen mit der Zeit undurchlässig werden, sucht sich das ungünstige Wasser den benachbarten Bereich aus und führt dort zu weiteren Verstopfungen. Die Verockerung, die anfangs nur auf eine kleine Zone des Filterrohres beschränkt war, kann sich also ohne weiteres auf größere Flächen ausdehnen und mit der Zeit zu nicht vorhersehbaren Alterungserscheinungen mit spürbarem Rückgang der Brunnenleistung führen.

Aus diesen Gründen ist es wichtig zu wissen, wie man verockerte Brunnen regenerieren kann.

- 2.8.2 Wiegand berichtet erstmals über Regenerierungsarbeiten, die 1929 durchgeführt worden sind (59). Die Brunnen wurden damals nur gesäuert, und zwar mit ca. 17 l arsenfreier, 32 %iger Salzsäure pro lfdm Filterrohr. Als ausreichende Einwirkungszeit sah man 6 Stunden an. Die Ergiebigkeit konnte von 0,5 - 1,0 auf 12 - 15 l/s gesteigert werden. Die Kosten einer Regenerierung betragen rd. 10 % der Neubaukosten eines Brunnens. Das entspricht im großen und ganzen etwa den heutigen prozentualen Aufwendungen für eine Regenerierung, obwohl damals nur gesäuert wurde.

Später wird die Säuerung, die bisher ein "ruhender" Vorgang war, durch Umspülung der Säure, z.B. im Drupugen-Verfahren nach Drobek, wirksamer gestaltet (13). Anfang der 50er Jahre wird erstmals Druckluft beim Regenerieren durch Moll und die Berliner Wasserwerke angewendet (38) (28). Beide Verfahren unterscheiden sich insofern, als

Moll die Druckluft über die Filterrohrschlitze in den Untergrund eintreten läßt.

Die Berliner Wasserwerke vermeiden diesen Effekt, um keinen Luftsauerstoff in den Grundwasserleiter einzuführen und um dort unerwünschte chemische Umwandlungen des gelösten Eisens und Mangans in ihren unlöslichen Zustand zu vermeiden. Die Druckluft soll hier lediglich eine schockartige Behandlung des Brunnens erzwingen, wobei die in den Filterrohrschlitzen und in der Kiesschüttung abgelagerten Verockerungsprodukte zusammen mit dem Wasser herausgerissen werden. Zeppernick (62) berichtet ebenfalls über die Anwendung von Druckluft. Kestner (26) und Caplan (28) erwähnen die Anwendung von anderen Chemikalien außer Salzsäure, vor allem von Hexametaphosphat und Calgon. Darüberhinaus werden Polyphosphate und Trockeneis für die Regenerierung empfohlen.

- 2.8.3 Die Regenerierung von Brunnen ist also nichts Neues. Sie wurde schon vor Jahrzehnten ausgeführt. Leider aber meist ohne großen bzw. langanhaltenden Erfolg. Das lag daran, daß die Methoden nicht kombiniert und daher nicht optimal angewendet worden sind. Regenerierungsarbeiten gerieten aus diesem Grunde auch völlig in Mißkredit, und man zog den Ersatz nicht mehr leistungsfähiger Brunnen durch Neubohrungen vor.

Systematische Untersuchungen bei den Berliner Wasserwerken haben gezeigt, daß kombinierte - und nur kombinierte - Verfahren zu guten Leistungssteigerungen führen. Es hat z.B. keinen Sinn, die Salzsäure ohne jede Vorarbeit in einen verockerten Brunnen hineinzuschütten, wie es früher meist üblich war. Kontrollen mittels Unterwasserkamera zeigten, daß die Salzsäure in einem so behandelten Brunnen nicht einmal in der Lage war, die Inkrustationen aufzulösen, die sich auf der Filterrohrinnenwandung abgelagert hatten. Um so weniger vermochten sie, auf die Ver-

ockerungen in den Filterrohrsclitzen und in der Kiesel-schüttung einzuwirken und diese zu beseitigen.

Eine Regenerierung kann nur dann einen guten Erfolg haben, wenn der Reinigungsvorgang in mehrere Abschnitte aufgeteilt wird. D r e i A b s c h n i t t e haben sich als zweckmäßig, aber auch als ausreichend erwiesen.

Grundsätzlich sei gesagt, daß sich eine Bearbeitung von Gewebefilterbrunnen nicht rentiert, da eine wesentliche Besserung der Leistung nicht zu erzielen ist. Kleine Erfolge halten nur kurze Zeit an. Die für die Arbeiten aufgewendeten Kosten stehen in keinem Verhältnis zum Erfolg. Man sollte deshalb derartige Brunnen nicht mehr bauen, sondern nur noch moderne Kiesschüttungsbrunnen. Aber auch die bei letzteren leider immer wieder verwendeten Gewebekörbe sind nicht zweckmäßig, da sie - wie der Verfasser festgestellt hat - die Wirkung von Regenerierungsarbeiten ganz erheblich mindern können.

Regenerierungsarbeiten sollten auf moderne Kiesschüttungsbrunnen beschränkt bleiben. Dort können sie bei richtiger Anwendung in den überwiegenden Fällen zu guten dauerhaften und auch wirtschaftlichen Erfolgen führen.

- 2.8.31 Der e r s t e Arbeitsabschnitt umfaßt die m e c h a - n i s c h e Reinigung der Brunnenrohre mittels Bürsten und Scheiben. Es ist zweckmäßig, unter die Bürste ein Gerät zu hängen, z.B. einen Stauchbohrer, das die von der Brunnenrohrwandung abgestoßenen Inkrustationen zum großen Teil auffängt. Es kann gleichzeitig als beschwerendes Gewicht der Bürste dienen, um mit ihr am Seil arbeiten zu können. Die darüber hinaus in den Brunnensumpf abgesunkenen Schlammteile müssen vor dem nächsten Arbeitsgang entfernt werden, am besten mit einer Preßluftpumpe.

2.8.32 Im z w e i t e n Arbeitsabschnitt wird zum Ablösen und Entfernen der noch verbliebenen Inkrustationen Preßluft verwendet. Sie wird in die Filterstrecke über ein Rohr eingeführt, das nur am unteren Ende mit kleinen horizontalen Bohrungen versehen ist. Durch diese Öffnungen strömt die Preßluft in Form von feinen, aber intensiven Strahlen gegen die Filterrohrwandung. Sie lockert die in den Schlitz-zen verbliebenen Inkrustationen und kann nach deren Ablö-sung in gewissen Grenzen auch noch auf die Ablagerungen in der Kiesschüttung einwirken. Während des Einblasens von Druckluft wird der Brunnen von Zeit zu Zeit durch ein Schnellschlußorgan geschlossen. Die Preßluft kann jetzt nicht mehr aus dem Brunnen austreten. Sie drückt den Wasserspiegel im Brunnen nach unten. Wenn dieser weit genug abgesunken ist - er darf nicht unter die Oberkante des Filterrohres zu liegen kommen, da dann Luftsauerstoff in den Untergrund käme - wird das Schnellschlußorgan ge-öffnet. Infolge der ruckartigen Entspannung schießt die Preßluft aus dem Brunnen an die Erdoberfläche und reißt dabei die inzwischen gelockerten Schlammteilchen aus den Filterrohrschlitzen und aus der Kiesschüttung mit dem Wasser zusammen heraus.



Bild 59

Die Schlammengen, die dabei zutage treten, sind z.T. recht erheblich (Bild 59). Dies ist ein Beweis für die gute Wirkung des Schockens auf die Verockerungsprodukte in den Filterrohrschlitzen und in der Kiesschüttung. Denn die beim Schocken herausgerissenen Schlammteile können nur von dort stammen, da die Innenwandung der Filterrohre vor Beginn dieses Arbeitsabschnittes infolge des Bürstens völlig sauber war. Die Spitze der Preßluftlanze bleibt solange an einer Stelle stehen, bis das Wasser klar ist (Bild 60).



Bild 60

Wenn die Filterrohre von oben bis unten in dieser Weise bearbeitet worden sind, wird die Filterstrecke a b - s c h n i t t s w e i s e intermittierend abgepumpt. Die Reinigungswirkung auf die Kiesschüttung ist dabei besonders gut, weil immer nur ein kleiner Teil des Filterrohres beaufschlagt wird.

Bei sehr tiefen Brunnen läßt die Wirkung des Schockens mit Preßluft wegen der großen Wasserüberdeckung stark

nach. Es empfiehlt sich dann, nur das abschnittsweise Abpumpen durchzuführen. Der schockartige Effekt wird dabei durch einen intermittierenden Betrieb bzw. ein Auf- und Abbewegen der Kammer erzielt.

2.8.33 Im d r i t t e n Arbeitsabschnitt wird bei Bedarf noch arsenfreie Salzsäure eingefüllt. Auch das erfolgt abschnittsweise mittels einer Kammer, die über die gesamte Filterstrecke verfahren wird, damit die Salzsäure auch wirklich an alle Stellen der Filterstrecke herangebracht wird. Infolge der vorausgegangenen Vorreinigung durch den ersten und zweiten Arbeitsabschnitt kann die Säure jetzt die Verockerungsprodukte in der Kiesschüttung wirksam angreifen, an die man anders nicht herankommt. Sie wird nicht schon durch die Inkrustationen im Filterrohr verbraucht. Um sie tief in die Kiesschüttung eindringen zu lassen, empfiehlt es sich, die Säure mittels Preßluft mehrmals in die Kiesschüttung hineinzudrücken; denn nur so kommt sie möglichst schnell und unverdünnt an die Stelle, wo sie ihre Wirkung tun soll.

2.8.4 Der Leistungsanstieg nach den einzelnen Arbeitsabschnitten läßt Schlüsse auf den Alterungsprozess zu (Bild 38). Die Leistung stieg z.B. nach Abschnitt 1 nur von 7 auf $9 \text{ m}^3/\text{h}$. Auf den ersten Blick scheint dieser Arbeitsgang also überflüssig zu sein. Das ist aber nicht der Fall, da durch ihn eine Reinigung des Filterrohrinneren erfolgt, die erst die Voraussetzungen für einen wirkungsvollen Effekt der folgenden Arbeitsgänge schafft.

Den größten Sprung macht die Leistung nach der Preßluftbehandlung. Er betrug bei mehreren untersuchten Brunnen im Mittel etwa 75 % des gesamten Leistungsanstieges nach der Regenerierung. Aus dieser Tatsache kann geschlossen werden, daß sich der Verockerungsprozess hauptsächlich

am Filterrohr und in seiner unmittelbaren Umgebung abspielt.

- 2.8.5 Auch H o r i z o n t a l b r u n n e n können regeneriert werden. Hier empfiehlt sich ebenfalls eine Dreiteilung des Regenerierungsvorganges wie beim Vertikalbrunnen. Die Arbeiten sind allerdings komplizierter und schwieriger, weil die Filterstränge unter einem hydrostatischen Druck stehen. Alle Arbeitsgeräte müssen über Schleusen eingeführt werden, wobei insbesondere kleine Schachtdurchmesser die Arbeiten stark behindern, wenn nicht überhaupt unmöglich machen können. Die Erfolge sind aber genauso gut wie beim Vertikalbrunnen.

Wegen der Schwierigkeit einer Regenerierung von Horizontalbrunnen sollte man daher versuchen, bei diesen Brunnen die Alterung zu verhindern bzw. einzudämmen. Leider ist die Behandlung ihrer Filterstränge mit keimabtötenden Mitteln lt. 2.4.5 nicht so einfach von der Erdoberfläche aus durchzuführen wie bei den Vertikalbrunnen. Es ist daher zweckmäßig, beim Vortrieb von Horizontalfiltersträngen in Grundwässern, die zur Verockerung neigen, gleichzeitig Einrichtungen einzubauen, mit denen eine Behandlung der Filterrohrstrecken möglich ist. Das könnten z.B. mit dünnen Bohrungen versehene Rohre oder Schläuche sein, die über dem Filterrohr liegen und bis zum Brunnenhaus hinauf geführt werden müßten. Das ist natürlich nur möglich bei Horizontalsträngen, die mit einer Kiesschüttung umhüllt werden. Die Bohrungen müssen in Größe und Anzahl so gewählt werden, daß das keimabtötende Mittel auch tatsächlich noch bis zur Strangspitze und dort in den Untergrund gelangt.

Der Vorgang dieser Arbeiten soll kurz anhand einiger Bilder erläutert werden.



Bild 61
Blick in den Brunnenschacht

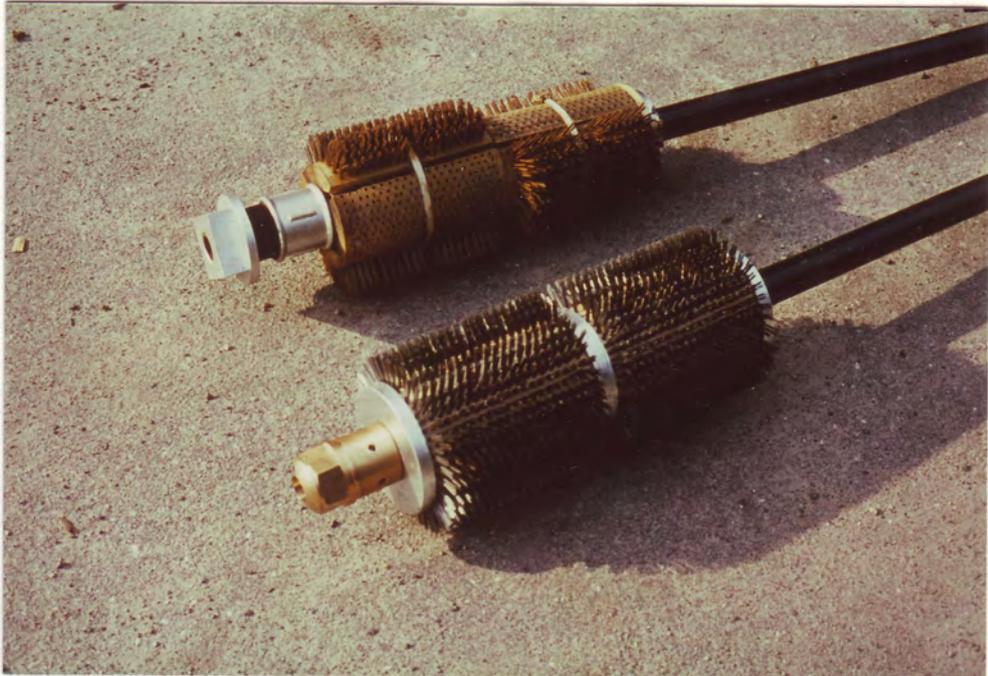


Bild 62
Bürsten für den 1. Arbeits-
abschnitt

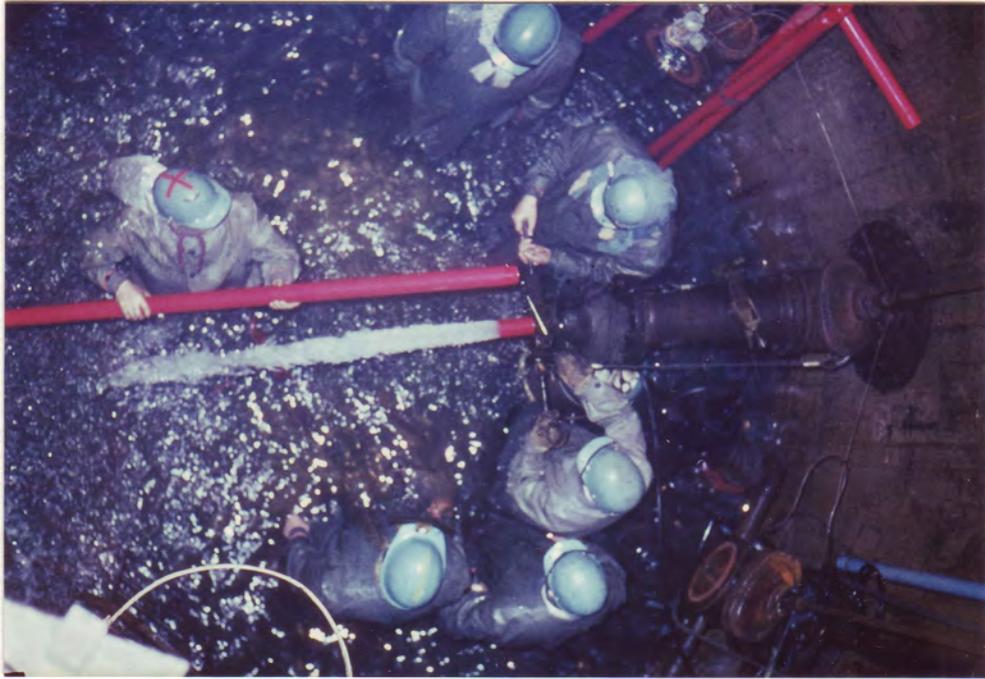


Bild 63
2. Arbeitsabschnitt: Schocken
mittels Kammer. Zu sehen ist
das Spülgestänge.



Bild 64
Entnahme von Wasserproben zwecks
Prüfung auf Sand und Verockerungs-
produkte.



Bild 65
Entnahme von Wasserproben zwecks
Prüfung auf Sand und Verockerungs-
produkte.



Bild 66
Einbau der Säurekammer in die Schleuse

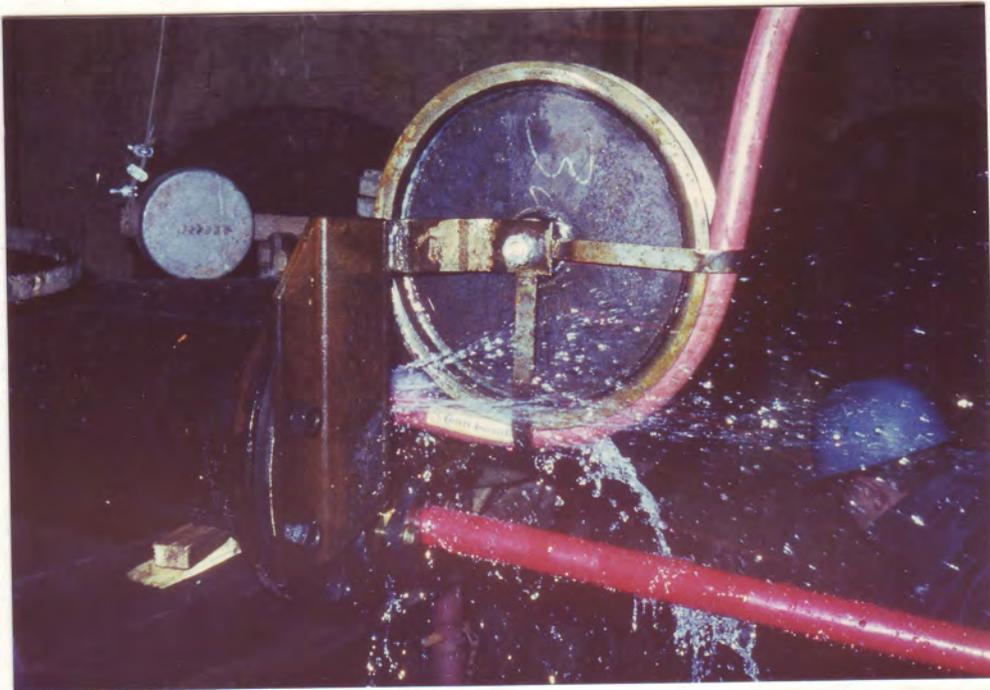


Bild 67
Säurekammer ist eingebaut

Durch den oberen hellroten Schlauch wird die Säure in die Kammer und damit in die jeweils zu behandelnde Filterrohrstrecke eingepreßt. Mit diesem Schlauch wird auch später die Kammer, die vor Beginn der Arbeiten bis an die Spitze des Stranges vorgeschoben worden ist, Stück für Stück zurückgezogen. Das untere dunkelrote Rohr ist das Vorschubgestänge, mit dem die Kammer nur eingefahren und das danach herausgezogen wird. Oberstes Gebot bei Säurearbeiten in Horizontalbrunnen ist, v o r Beginn des Einpressens der Salzsäure keine Arbeiter mehr im Brunnenschacht zu haben. Damit dies auf jeden Fall gewährleistet ist, wird der Brunnenschacht vor der Säuerung geflutet.

Der Säureschlauch muß also bis zum Brunnenhaus hinauf und aus diesem noch hinausgeführt werden. Damit er beim etappenweisen Zurückziehen der Säurekammer im Strang, das ja von oben erfolgt, keine Beschädigungen erleiden kann, ist seine Führung über eine Umlenkrolle, die an der Schleuse befestigt ist, notwendig.



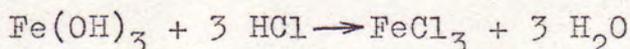
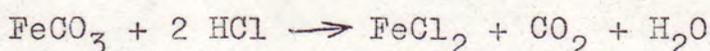
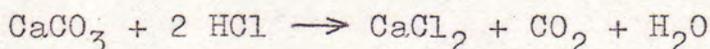
Bild 68: Säuerung

Das Einfüllen der Säure muß aus Sicherheitsgründen außerhalb des Brunnenhauses geschehen.

- 2.8.6 Die Gefahren beim Säuern können, vor allem in Horizontalbrunnenschächten, sehr groß sein. Tödlich verlaufene Unfälle machen diesen Hinweis besonders notwendig. Außer der Gefährdung durch die Säure selbst sind die Gase CO_2 und H_2S zu nennen, die bei den chemischen Vorgängen entstehen. Viele glauben, daß nur CO_2 gefährlich wäre, weil es wegen seiner Geruchlosigkeit nicht bemerkt werden kann. Das Schwefelwasserstoffgas ist aber ebenso heimtückisch, wenn nicht noch gefährlicher. In schwacher Kon-

zentration ist es zwar an seinem üblen Geruch wahrnehmbar, in stärkerer und damit besonders giftiger Konzentration kann man es jedoch nicht mehr riechen, weil die Geruchsnerven sofort betäubt sind.

Säuerungs Vorgänge:



Nebenvorgang:



2.8.7 Der Erfolg einer Regenerierung kann nicht allein vom Zustand der Filterrohre, der z.B. mit einer Unterwasserkamera festgestellt worden ist, abgeleitet werden. Auch ein völlig sauberes Brunnenrohr ist keine Garantie für einen guten Erfolg. Es könnten ja noch außerhalb des Filterrohres verbliebene Inkrustationen die Brunnenleistung mindern. Deshalb sind andere Kontrollen wichtiger, wie z.B. ein vergleichendes Leistungsabpumpen vor und nach der Regenerierung unter gleichen Voraussetzungen. Da auch dieses Verfahren in vielen Fällen nicht eindeutig auf die Leistung des neuen Brunnens bezogen werden kann, ist der beste Vergleich die Beobachtung des Rückganges des Durchflußwiderstandes Δh (siehe Abschnitt 2.7.3). Nach gut durchgeführten Regenerierungsarbeiten geht Δh meist auf den Wert des neuen Brunnens zurück (Bild 47).

2.8.8 Die Kosten einer Brunnenregenerierung in 1972 sollen am Beispiel eines 35 m tiefen Vertikalbrunnens, der mit 13 m kupfernen Filterrohren NW 200 mm ausgerüstet ist und der sehr stark verockert war, erläutert werden.

Es entstanden an:

a) Lohnkosten:

Ein- und Ausbau des Brunnenkopfes, der U-Pumpe usw.	1.280,-	
Arbeitsvorgang 1 (Bürsten)	280,-	
" 2 (Schocken)	570,-	
" 3 (Säuern)	700,-	
Transporte u. Nebenarbeiten	550,-	
	<u>3.380,-</u>	rd. 3.400,- DM

b) Betriebsstoffe 200,- DM

c) Werkzeuge 200,- DM

d) zusätzl. Materialien 750,- DM

e) 1 t Salzsäure 250,- DM

Gesamtkosten: rd. 4.800,- DM

Ein neuer Brunnen gleicher Tiefe und gleichen Bohrdurchmessers NW 800 würde einschl. Brunnenmaterial, Schacht, Brunnenkopf und Unterwasserpumpe rd. 48.000,- DM, ohne Unterwasserpumpe und Materialien für den Brunnenkopf rd. 40.000,- DM kosten. Für die Brunnenregenerierung mußten also nur 10 % bzw. 12 % der Neubaukosten aufgewendet werden. Das ist ein sehr gutes Ergebnis, zumal der Brunnen wieder auf eine gute Leistung, nämlich fast auf die des neuen Brunnens kam und aufgrund der Erfahrungen dem Betrieb wieder fast die gleiche Zeit wie seinerzeit der neue Brunnen zur Verfügung stehen wird.

2.9. Konsequenzen für Bau, Betrieb und Überwachung von Trinkwasser- Notbrunnen

2.9.1 V e r s a n d u n g

2.9.11 W a h l d e s F i l t e r f a k t o r s

$$S = D_{50} : d_{85} = 4$$

Die Filterrohrschlitze verstopfen umso schneller, je schmaler sie sind. Man sollte also bemüht sein, die

Schlitze so breit wie möglich zu wählen. Ihre Breite ist aber abhängig von der Korngröße der inneren Kiesschüttung, diese wiederum von der zulässigen Korngröße der äußeren Schüttung.

Maßgebend ist also die äußere Kiesschüttung, die auf den durchbohrten Boden abgestimmt sein muß. Das größte äußere Schüttkorn ergibt sich in den meisten Fällen dann, wenn der Filterfaktor D/d nach Davidenkoff bestimmt wird. Diese Methode ist jedoch für die Praxis noch mit einem zu großen Risiko verbunden, weil sie nur für gleichförmige Böden gültig ist. Sie muß durch Versuche ergänzt werden, die auf die in der Praxis vorkommenden gemischt-körnigen Böden abgestimmt sind.

Es wird deshalb vorgeschlagen, den Filterfaktor $S = D_{50} : d_{85} = 4$ zu wählen. Darin bedeutet d_{85} den Bodenkorndurchmesser aus der Siebsummenkurve bei der 85 %-Linie und D_{50} den mittleren Korndurchmesser des Schüttkieses. Das ist eine Methode, die gegenüber dem bisher meist gebräuchlichen Filterfaktor $D_{50} : d_{50} = 4$ ein größeres Außenkorn ergibt, die aber durch Versuche mit natürlichen gemischt-körnigen Böden untermauert ist.

Angaben über die Abstufung der Korndurchmesser der einzelnen Kiesschüttungen gibt die DIN 4924 (12). Im übrigen wird für sehr ungleichförmige Böden auf die Methode der Bodenkennlinie nach Bieske jr. hingewiesen (5).

Bei außergewöhnlichen Sieblinien sowie bei außergewöhnlicher Schichtenfolge sind von der Bohrfirma besondere Maßnahmen vorzuschlagen.

2.9.12 "Entsandten" des Brunnen

Bei der Regenerierung mancher Brunnen hatte sich gezeigt, daß deren Leistung danach besser war als beim neuen Brunnen. Diese Erscheinung war zunächst nicht zu erklären.

Nach eingehenden Vergleichen mit später gebohrten Brunnen konnte sie dann darauf zurückgeführt werden, daß die älteren Brunnen nach ihrer Fertigstellung nicht - wie später üblich - "entsandet" worden waren. Diese "Entsandung" ist allerdings nicht im Sinne einer Hochleistungsentsandung zu verstehen. Die Brunnen werden lediglich abschnittsweise *i n t e r m i t t i e r e n d* mit einer Leistung abgepumpt, die deutlich über der liegt, mit der der Filterrohrabschnitt im späteren Betrieb beaufschlagt wird. Als Beispiel seien die Brunnen im Berliner Raum angeführt, die überwiegend in diluvialen Sanden stehen und einen Bohrenddurchmesser NW 800 mm haben. Die Kammer, die mit einer Unterwasserpumpe gekoppelt ist, hat eine Länge von 1,0 m. Die Leistung der Pumpe beträgt $25 \text{ m}^3/\text{h}$. Ein allgemeingültiges Maß für die Abpumpdauer pro Abschnitt kann nicht angegeben werden, weil dies von der Beschaffenheit des jeweiligen Bodens abhängig ist. In den Berliner diluvialen Sanden mußte ein rd. 40 m tiefer Brunnen mit 15 m Filterrohr ca. 10 Stunden abgepumpt werden, bis alle Abschnitte so sandfrei waren, daß bei Wasserproben in großen Spitzgläsern, sogenannten Imhoff-Gläsern, kein Sandkorn mehr festzustellen war. Diese Methode der Bestimmung der Sandfreiheit war ausreichend genau; denn es wurde später zu keiner Zeit in den Armaturen des Brunnenkopfes oder in den Rohrleitungen Sand gefunden. Im Durchschnitt sind etwa 1 - 2 Stunden pro lfdm Filterrohr erforderlich.

Die Wirkung des "Entsandens" ist umso besser, je dünner die Kiesschüttung ist. In den überwiegenden Fällen - vor allem in Lockergesteinen - wird die 2-fache Schüttung notwendig, aber auch ausreichend sein. 3-fache Schüttungen sind möglichst zu vermeiden und nur in Ausnahmefällen anzuwenden, wie z.B. dort, wo sehr feine Bodenschichten unbedingt mit Filterrohren ausgebaut werden müssen, da keine besseren Schichten vorhanden sind.

Jeder Brunnen sollte "entsandet" werden.

2.9.13 Zweimal im Jahr ist die Brunnen tiefe zu kontrollieren. Bei Fehltiefen sind entsprechende Maßnahmen einzuleiten. Die Kontrolle kann durch das Brunnenpeilrohr im Rahmen der turnusmäßigen Überwachung ohne großen Aufwand ausgeführt werden.

2.9.14 Beim turnusmäßigen Abpumpen eines Brunnens im Rahmen der Überwachung ist jedesmal die Sandfreiheit mit möglichst großen Imhoff-Gläsern zu überprüfen. Auch dies erfordert keinen besonderen Aufwand.

2.9.2 Korrosion

Für Brunnen- und Pumpensteigrohre ist korrosionsfestes Material zu wählen. Die notwendige Stabilität erfordert Stahlrohre. Eine Verzinkung ist kein ausreichender Korrosionsschutz. Zweckmäßig sind kunststoffüberzogene Brückenschlitzfilterrohre und Vollwandrohre. Beim Einbau ist sorgfältig auf Beschädigungen des Überzuges zu achten, die durch den Transport oder auf der Bohrstelle entstanden sein können. Die schadhafte Stellen sind vor dem Einbau einwandfrei auszubessern. Auf diese Forderung sind die Bohrfirmen ganz besonders hinzuweisen, da Versäumnisse in dieser Hinsicht nicht nur zu Korrosionsschäden, sondern auch zu erheblichen Folgeschäden führen. Zu nennen sind als solche vor allem ein Durchbruch der Kiesschüttung durch das infolge Korrosion zerstörte Filterrohr und damit verbunden ein Durchbruch des anstehenden Bodens, der meist einen totalen Verlust des Brunnens bedeutet. Ungeschütztes Eisen wird weiterhin zum Lieferanten von Fe-Ionen. Ein Brunnen, der aufgrund seiner Wasseranalyse nicht verockern würde, altert infolge einer biologischen Verockerung selbst dann, wenn er nicht betrieben wird. (siehe Abschnitt 2.4.5).

Die gleiche Forderung gilt für Hilfseinbauten, wie z.B. Abstandsschellen.

2.9.3 V e r s i n t e r u n g

Hier sind keine besonderen Maßnahmen zu treffen; auch dann nicht, wenn ein Brunnen ausnahmsweise einmal zu einer Versinterung neigen sollte. Dies wäre dann zu erwarten, wenn die Kalkanteile im Wasser sehr groß sind, das Brunnenwasser sich gerade im Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht befindet und beim Betrieb des Brunnens mit einer nennenswerten Unterschreitung dieses Gleichgewichts zu rechnen ist. Das wäre denkbar bei Brunnen in Festgesteinen, in denen sehr große Absenkungen und damit sehr große Druckentlastungen des Grundwassers auftreten können. Selbst unter diesen Voraussetzungen stellt die Versinterung für den Brunnen keine große Gefahr dar, weil seine Betriebsdauer beschränkt ist und eine Versinterung nicht eintreten kann, solange der Brunnen nicht betrieben wird.

2.9.4 V e r o c k e r u n g

2.9.41 B e i m B a u des Brunnens ist nicht nur darauf zu achten, daß die Brunnenrohre unbeschädigt bzw. ausgebessert eingebaut werden, sondern auch darauf, daß nicht durch Unachtsamkeit oder Bequemlichkeit ungeschützte eiserne Materialien, wie z.B. Niete oder Schrauben, im Brunnen oder in der Kiesschüttung verbleiben. Diese werden zu Lieferanten von Fe-Ionen für Eisen- und Manganbakterien und führen auch dann zur Verockerung, wenn im Brunnenwasser kein 2-wertiges Eisen und Mangan enthalten sind. Außerdem verockert sogar ein nicht-betriebener Brunnen, selbst wenn sein Wasser nicht zur Verockerung neigen sollte.

- 2.9.42 Je breiter die Filterrohrschlitze und je größer die Poren der Kiesschüttung sind, umso weniger schnell verstopfen sie unter sonst gleichen Voraussetzungen. Deshalb gilt hier das unter Abschnitt 2.9.11 Gesagte gleichermaßen.
- 2.9.43 A u s r ü s t u n g m i t e i n e m P e i l r o h r i n d e r ä u ß e r e n K i e s s c h ü t t u n g lt. Abschnitt 2.7.3.

Dieses Peilrohr sollte zur selbstverständlichen Ausrüstung jeden Brunnens gehören. Mit ihm sind alle Veränderungen innerhalb der Kiesschüttung und der Filterrohrschlitze hinsichtlich einer Verstopfung jeglicher Art festzustellen und zu beobachten.

Der Peilfilter muß mindestens in Höhe der Filterrohr-oberkante des Brunnens liegen, besser etwas darunter. Verzichten sollte man darauf - wenn überhaupt - nur dort, wo eindeutig nicht mit einer Verockerung zu rechnen ist oder wo die Filterrohroberkante erst in sehr großer Tiefe beginnt. Der Einbau ist dann etwas kompliziert, und es kann bei nicht einwandfreier Arbeit zu Beschädigungen des Peilrohres kommen. Als Material sind Kunststoffrohre zu verwenden.

Daß der Brunnen selbst mit einem Peilrohr oder einem Peilstutzen auszurüsten ist, sei der Selbstverständlichkeit wegen hier nur am Rande vermerkt.

- 2.9.44 Obwohl Trinkwasser-Notbrunnen nur an wenigen Tagen im Jahr der Überprüfung halber betrieben werden und daher aufgrund der neuesten Erkenntnisse kaum oder gar nicht verockern dürften, sind z.B. in Karlsruhe und in Mannheim sehr starke Verstopfungen der Unterwasserpumpen aufgetreten. Z.T. waren diese so stark, daß die Pumpen bei ihrem Probetrieb nicht in Gang gesetzt werden konnten. Pumpe

und Steigrohre waren insbesondere in Karlsruhe wegen der starken Korrosionserscheinungen Lieferanten für Eisen-Tonen, die selbst in einem nicht-betriebenen Brunnen zur Massenentwicklung von Eisen- und Manganbakterien führen.

Bei den Steigrohren ist am ehesten Abhilfe durch Verwendung von kunststoffüberzogenen Stahlrohren zu schaffen. Verzinkte Rohre genügen nicht den Anforderungen. Das gleiche gilt für bituminös getauchte oder angestrichene Rohre. Am besten wären reine Kunststoffrohre, evtl. mit Glasfaserverstärkung. Ob diese auf die Dauer jedoch den Festigkeitsanforderungen genügen, die bei Brunnen der Notversorgung besonders groß sind, kann z. Zt. noch nicht eindeutig beantwortet werden. In Berlin sind seit längerer Zeit nicht armierte Kunststoffrohre mit Flanschen ohne Beanstandungen im Einsatz. Schrauben sollten aus V2-A bzw. V4-A-Stahl sein.

U n t e r w a s s e r p u m p e n werden z.T. mit Anstrichen versehen, die auf die Dauer keinen ausreichenden Korrosionsschutz gewähren. Abhilfemaßnahmen sind der Einbau von Opferelektroden aus einer Aluminium-Magnesium-Legierung oder Einbrennlacke auf den Pumpenkörpern. Die Opferelektroden sind relativ billig, müssen aber von Zeit zu Zeit erneuert werden. Eine weitere Maßnahme, um die Unterwasserpumpe vor Verstopfungen infolge einer Massenentwicklung von Eisen- und Manganbakterien zu schützen, wäre eine turnusmäßige Behandlung mit keimabtötenden Mitteln. Die Gefahr, daß dabei der Pumpenkörper durch die Chloride korrosiv angegriffen wird, ist nicht allzu groß, wenn eine 5 %ige Lösung verwendet wird, weil schon kurz nach dem Einfüllen eine Verdünnung erfolgt und die Einwirkungszeit auch nur relativ kurz ist. Die Behandlung müßte im Abstand von etwa 2 - 3 Monaten erfolgen. Unterwasserpumpen, die in Berliner Brunnen Verstopfungen auf-

wiesen, konnten durch eine derartige Behandlung sauber gehalten werden. Die Behandlung erfolgt hierbei automatisch zusammen mit der Behandlung des Brunnens. Bei Trinkwasser-Notbrunnen brauchte die Chlorlösung lediglich in das Pumpensteigrohr eingefüllt zu werden, sofern über der Pumpe keine Rückschlagklappe sitzt. Anderenfalls stände das Brunnenpeilrohr, dessen Unterkante jedoch über der Pumpe liegen müßte, als Einfüllstutzen zur Verfügung. In den überwiegenden Fällen wäre eine Verwendung von HTH-Tabletten wahrscheinlich völlig ausreichend.

Die beste Lösung wäre natürlich, die Pumpe erst dann einzubauen, wenn sie benötigt wird.

Das Lufthebeverfahren mittels Mammutpumpe hat Vor- und Nachteile. Der größte Vorteil ist der, daß lediglich kleinkalibrige Steigrohre aus Kunststoff erforderlich sind, die bei Bedarf aufgrund ihres geringen Gewichtes einfach, schnell und billig sowie ohne großen Personal- und Geräteaufwand eingebaut werden könnten. Ihr Ein- und Ausbau wäre deshalb auch beim üblichen Kontrollabpumpen des Brunnens kein Problem. Allerdings müßte jedesmal ein Kompressor zur Verfügung stehen. Die Überwachungskosten würden dadurch höher ausfallen, als wenn die Unterwasserpumpe lediglich über Ortsnetz in Betrieb genommen würde.

Das Lufthebeverfahren kann aber einen Nachteil haben; wenn das zu fördernde Wasser zweiwertiges Eisen und Mangan enthält. Diese Stoffe werden infolge der intensiven Mischung des Wassers mit dem Sauerstoff der eingeblasenen Luft sehr schnell oxidiert. Mit der Zeit sind deshalb Eisen- und Manganausfällungen im Förderrohr möglich. Da der Aus- und Wiedereinbau, auf den sogar notfalls noch verzichtet werden könnte, sowie die Reinigung dieser Rohre ein unbedeutender Aufwand sind, wäre ihre Inkrustation kein Problem; es sei denn, das ausgefällte Eisen und Mangan führt zu unangenehmen Begleiterscheinungen in Einrichtungen, die dem Förderrohr nachgeschaltet sind. Bei Berliner Regenerierungsarbeiten

mit Preßluftpumpen sind trotz eines Fe-Gehaltes von etwa 1 mg/l derartige Inkrustationen nicht aufgetreten. Wahrscheinlich läßt das Luft-Wasser-Gemisch Ablagerungen gar nicht erst entstehen.

Der Vorschlag des Amtes für Zivilschutz der Stadt Karlsruhe (65) sollte daraufhin untersucht werden, ob im Notfall eine ausreichende Anzahl von Kompressoren zur Verfügung stehen. Vielleicht ist dem Lufthebeverfahren wegen anderer Gründe der Vorzug zu geben. Es wäre denkbar, daß im Notfall eine Versorgung der Unterwasserpumpen mit Fremdstrom nicht eindeutig gewährleistet ist. Falls die Energieversorgung von Notstromaggregaten übernommen werden müßte, wären Kompressoren zweckmäßiger.

Eine Klärung der angedeuteten Fragenkomplexe ist im Rahmen dieser Studie nicht möglich. Dazu haben die jeweiligen örtlichen Verhältnisse einen zu großen Einfluß

- 2.9.46 Beim Abpumpen des Brunnens nach seiner Fertigstellung sind außer den allgemein üblichen Analysendaten insbesondere Fe^{++} und Mn^{++} sowie das Redoxpotential festzustellen. Lt. Abschnitt 2.4.5 sind diese Werte ein ausschlaggebendes Kriterium für eine Massenentwicklung von Eisen- und Manganbakterien.
- 2.9.47 Beim turnusmäßigen Kontrollpumpen ist die Wasserspiegeldifferenz Δh zwischen Brunnen und Kiesschüttung zu messen und für jeden Brunnen listenmäßig zu erfassen oder graphisch aufzutragen.
- 2.9.5 Ein T r i n k w a s s e r - N o t b r u n n e n sollte - kurz zusammengefaßt - folgendermaßen gebaut, überwacht und betrieben werden:

- 1) korrosionsfestes Material für Brunnenrohre und -einbauten (keine Lieferanten von Fe-Ionen)
- 2) keine Materialien wie Nieten, Schrauben usw. als Lieferanten von Fe-Ionen im Brunnen belassen
- 3) Filterfaktor $S = D_{50} : d_{85} = 4$ (Ausnahmen siehe 2.1)
- 4) höchstens 2-fache Schüttung
- 5) keine Gewebekörbe
- 6) abschnittsweise "Entsandung"
- 7) Messung des Redoxpotentials
- 8) Feststellung von Fe^{++} und Mn^{++}
- 9) Peilmöglichkeit im Brunnen
- 10) Peilrohr in äußerer Kiesschüttung
- 11) Turnusmäßige Überprüfung der Brunnentiefe
- 12) Guter Korrosionsschutz für Unterwasserpumpe (ggf. Einbrennlack, Opferelektroden)
- 13) evtl. Lufthebeverfahren
- 14) evtl. Behandlung mit keimabtötenden Mitteln

2.10. Schlußwort

Falls das Brunnenrohrmaterial bzw. die -einbauten keine sogenannten Lieferanten von Eisen-Ionen sind, tritt nach den neuesten Erkenntnissen bei einem n i c h t b e t r i e b e n e n Brunnen kaum eine Alterung und auch dann k e i n e merkliche V e r o c k e r u n g auf, wenn das Grundwasser aufgrund seines Redoxpotentials und seiner zweiwertigen Eisen- und Manganhalte zur Verockerung neigt; denn die Eisen- und Manganbakterien für eine Massenentwicklung bekommen nicht genügend Nährstoff angeboten. T r i n k w a s s e r - N o t b r u n n e n dürften also unter der Voraussetzung, daß sie richtig

gebaut und das richtige Material gewählt worden ist,
n i c h t v e r o c k e r n .

Die Brunnen für die Trinkwasser-Notversorgung geben die einmalige Gelegenheit, diese Erkenntnisse in einem großen Rahmen und über die verschiedensten Wassergewinnungsgebiete verteilt zu überprüfen. Man sollte deshalb der Wissenschaft und der Praxis einen großen Dienst erweisen und eine bestimmte Anzahl von Brunnen, die aufgrund der in Abschnitt 2.4.5 genannten Kriterien zur Verockerung neigen, in einem Versuchsprogramm zusammenfassen. Die Aufgabe wäre die Überprüfung der Richtigkeit der bisherigen Erkenntnisse.

2.11. L i t e r a t u r v e r z e i c h n i s

1. Adler: 1901 Deutsche med. Wochenschrift 26, 431
" 1903 Cbl. Bakt. II, 9
" 1931 Z. f. Kurortwiss. Bd. 1, Heft 4

2. Baier: "Natürlich versickertes und künstl. ange-
reichertes Wasser", Gesundheitsingenieur 1943

3. Beger: "Die Eisenbakterien in Wasserversorgungsanlagen
und ihre praktische Bedeutung", GWF 1937

4. Bieske: "Bohrbrunnen", 1928 u. 1953
" "Verockerung und Alterung von Bohrbrunnen"
Bohrtechnik-Brunnenbau 1960, H. 11
" "Handbuch des Brunnenbaues", Bd. II, 1965
" Wasser-Kalender 1973, Jahrbuch für das gesamte
Wasserfach

5. Bieske, "Zur Schüttkornbestimmung bei Kiesschüttungs-
jun. : brunnen", Bohrtechnik-Brunnenbau-Rohrleitungs-
bau 1961, H. 9
" "Beispiel eines inkrustierten Filterrohres",
Bohrtechnik-Brunnenbau-Rohrleitungsbau 1962, H. 2

6. Boorsma: "Chem. Vorgänge an Grundwasserfassungen",
Erwiderung, GWF 1957, H. 18

7. Boorsma, "Zur Frage der Dimensionierung von Bohrbrunnen",
Jansen u. GWF 1959, H. 2
Haasnoot:

8. Caplan: "Increasing well yields with calgon treatment"
Water and Sewageworks 1953
9. Chardabellas: "Durchflußwiderstände im Sand und ihre Abhängigkeit von Flüssigkeits- und Bodenkennziffern", Diss. TU Berlin 1940
10. Charlet u. Schwartz: "Untersuchungen über die Lebensweise von Leptothrix ochrocea und einigen begleitenden Eisenmikroben", Schweiz.Z.f.Hydrobiol. 16 (1954)
11. Davidenkoff: "Dimensionierung von Brunnenfiltern"
Mitt.bl. der BAW Karlsruhe, Heft 25/1967
12. DIN 4924: "Filtersande und Filterkiese für Brunnenfilter", DIN 4924/1972
13. Drobek: "Die Trinkwasserversorgung vom Standpunkt des Technikers", Zbl. Bakt. I, Orig. 160/1953
" " "Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft der Wasserversorgung, Hamburger Wasserwerke 1954
14. DVGW-Regelwerk: "Hinweise zur Verhütung der biologischen Brunnenverockerung", DVGW-Merkblatt W 131/1970
15. Fehlmann: Schweizer Bauzeitung 1949, H. 23 u. 24
16. Fuchs: "Die wirksamste Abstufung von künstl. Kies-schüttungen in den Filterstrecken bei Bohrburgen" Mitt.bl. Inst. f. Wasserbau und Wasserwirtschaft der TU Berlin Nr. 60/1963

17. Ganter u. Schwartz: Schweiz. Z. f. Hydrobiol. 18 (1956)
18. Gerb: "Chem. Vorgänge an Grundwasserfassungen",
GWF 1956, H. 14
19. Groß: "Handbuch der Wasserversorgung", 1930
20. Hässelbarth/Lüdemann: "Die biologische Verockerung von Brun-
nen durch Massenentwicklung von Eisen-
und Manganbakterien", Bohrtechnik-
Brunnenbau-Rohrleitungsbau 1967, H. 10
u. 11
" " "Die biologische Enteisung und Ent-
manganung", vom Wasser XXX VIII,
Band 1971
21. Höhnl: Jahrbuch "Vom Wasser" 22/1955
22. Holluta: GWF 1951/ Heft 24
23. Jäkel: "Ergiebigkeitsminderung von Brunnen in-
folge Verockerung", Wasserwirtschaft -
Wassertechnik 1959/H. 3
24. Johnson, Inc. "The corrosion an incrustation of well
screens" Bulletin No. 834/1955
25. Kepinski: "Die Werte der Reynold'schen Zahlen bei
Wasserzufluß zu Brunnen", Oest. Wasser-
wirtschaft 1968, H. 11/12

26. Kestner: "Einführung von Chemikalien in eine Brunnenreihe zur Verhinderung des Zusetzens des Grundwasserleiters", Waterworks Eng. 1957, H. 7
27. Kling: "Druckverlust von Kugelschüttungen", VDI-Zeitschrift 1940, H. 5
28. Krems: "Leistungssteigerung im Wasserwerksbetrieb" Z. f. GW-Verlag, Frankf./M., 1958
" " "Wasser und Boden" 5 (1961)
" " "Verhütung der biologischen Brunnenverockerung durch Behandlung mit keimabtötenden Mitteln" (unveröffentlicht)
29. Kruse: "Wasser" 1949
" " GWF 1953
30. Kucera u. Wolfe: J. Bact. 74 (1957)
31. Kuntze: "Stand der Erfahrungen im Erkennen und Verhüten von Verockerungen", Wasser und Boden 5/1966
" " "Schutzmaßnahmen gegen Verockern: Sauger unter Wasser?", Wasser und Boden 10/1968
32. Lang, R. "Reinigung eines Brunnens mittels Luft- und Wasserspülung", Bohrtechnik-Brunnenbau 1956, H. 10
33. Lehr: "Das Trink- und Brauchwasser" 1936
" " "Änderungen der chem. Eigenschaften des Grundwassers", Z. Gesundheitstechnik u. Städtehygiene 1935

34. Ludewig: "Die Gültigkeitsgrenzen des Darcy'schen Gesetzes bei Sanden und Kiesen", Wasserwirtschaft - Wassertechnik 1965, H. 12
35. Mahrung: Gesundheitsingenieur 1942
" GWF 1941/Heft 49/50
" "Entgegnung auf besondere Schwierigkeiten im Rohrbrunnenbau", GWF 1942
36. Margrove: Journ. Americ. Water Works Ass. 59 (1957)
37. Möll: "Rohrbrunnenfilter", Gesundheitsingenieur 1942
38. Moll: "Erfolgreiche Regeneration von tiefen Kies-schüttungsbrunnen", GWF 1953, H. 6
" "Eine Theorie der Verockerung und Versinterung" Bohrtechnik - Brunnenbau 1959/H. 1
" "Regenerierung alter Brunnen", Wasser, Luft u. Betrieb 1962/Nr. 9
39. Moser: "Trinkwassernotversorgung der Stadt Mannheim"
40. Nahrgang: "Über die Stabilität und Dimensionierung von Sand- und Kiesfiltern" 1972 (unveröffentlicht)
41. Naumann, E.: "Reinigung von Brunnenrohren durch Säuren und damit verbundene gesundheitliche Gefahren" Gesundheitstechnik u. Städtehygiene 25/34
" Vortrag auf "Deutscher Brunnenbauertag" 1960, Berlin

42. Nold: Brunnenfilterbuch, 1961
43. Obstfelder: "Die Schnellreinigung von Rohrbrunnen"
Bohrtechnik-Brunnenbau 1960/H. 4
44. Paavel: "Neue Methoden der Grundwassererschließung"
DVGW 1952
" Bohrtechnik - Brunnenbau 1952, H. 3
" "Wasserefassung und Wasseranreicherung",
DVGW 1953
45. Pengel u. Bieske: "Der praktische Brunnenbauer", 1932
46. Pràve: Arch. f. Mikrobiol. 27 (1957)
47. Preobaschenskaja: "Über die Ökologie und Biologie von Eisen-
bakterien", Mikrobiologie 6/1937
48. Preß: "Taschenbuch der Wasserwirtschaft"
49. Prinz: "Handbuch der Hydrologie"
50. Riempp: "Untersuchungsergebnisse über Brunnenver-
ockerung", Mitt. d. Inst. f. Wasserwirt-
schaft Berlin 1964, H. 4 und 1965, H. 23
" "Brunnenverockerung an Vertikalbrunnen"
WWT 1964, H. 4
51. Rippel-Baldes: "Grundriß der Mikrobiologie" / 1952

52. Rössler: Balneolog. Zentral.Ztg. Nr. 42/1902
53. Schneider: "Die Wassererschließung", Teil I / 1952
" Brunnenbau und Tiefbohrtechnik, 1950
" "Neuere Methoden der Grundwassererschließung", DVGW 1952
54. Schweissfurth: Veröff. d. Abteilung u. des Lehrstuhls für Wasserchemie Karlsruhe, 1966, H. 1
55. Truelsen, Chr.: "Korngrößenbestimmung der Kiesschüttungen für Bohrbrunnen", Bohrtechnik - Brunnenbau 1957/H. 10
" "Bohrbrunnen-Dimensionierung zur Verhütung ihrer Verockerung und Verkrustung", GWF 1958, H. 8
" "Neue Erkenntnisse zur Verhinderung der Alterung von Bohrbrunnen", BBR 1958
" "Langjährige Erfahrungen und neuere Erkenntnisse im Bohrbrunnenbau", BBR 1961
56. TU - Berlin: "Strömungsvorgänge in Brunnenschüttkiesen" Forschungsvorhaben Wasser Nr. 8/8; Inst. f. Wasserbau u. Wasserwirtschaft 1965
57. Weber: "Korngröße bei Hochleistungsbrunnen", GWF 1963/H. 4
58. Wiederhold: "Offene Fragen der Filtertechnik", GWF 1954, H. 20/22
" "Zur Bemessung von Bohrbrunnen", GWF 1959, H. 18

59. Wiegand: "Inkrustierung von Brunnen und deren Beseitigung auf chem. Wege", GWF 1929, H. 30
60. Wickert: "Untersuchungen über den Gültigkeitsbereich des Darcy'schen Gesetzes und den Beginn von Turbulenz in einer Sickerströmung", Der Bauingenieur 1956, H. 1
61. Winogradsky: "Über Eisenbakterien", Bot. Ztg. 1888/46
62. Zeppernick/Wilke: "Regenerierung von Rohrbrunnen mit Druckluft", WWT, 1964, H.
63. Zweck: Versuchsergebnisse über die Zusammensetzung von Filtern", Mitt.bl. d. BA f. Wasserbau Karlsruhe Nr. 12 / 1959
64. - "Bericht über die Trinkwassernotbrunnen der Stadt Karlsruhe" 1972, Amt f. Zivilschutz der Stadt Karlsruhe
65. - "Untersuchung über die Anwendbarkeit des Lufthebeverfahrens bei Brunnen zur Sicherung der Trinkwassernotversorgung" (Entwurf)