

Erfahrungen beim Brunnenbau

Autor(en): **Meyer, Karl Heinrich**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria**

Band (Jahr): **78 (1986)**

Heft 9

PDF erstellt am: **22.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-940865>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

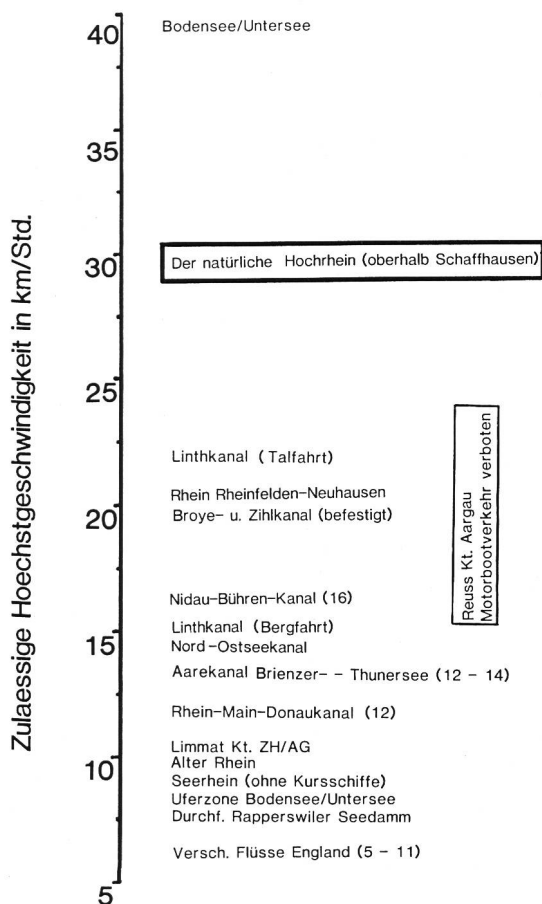


Bild 11. Vergleich der zulässigen Höchstgeschwindigkeiten in verschiedenen Gewässern.

den. Neben den Weiden gibt es eine Anzahl anderer Ufergehölze, mit deren Ansiedlung das vorerst monotone Weidenufer in einer späteren Bepflanzungsphase belebt werden soll.

Die anzustrebende naturnahe Bauweise erfordert eine sorgfältige und detaillierte Projektierung und eine kundige und einfühlsame Baubegleitung. Einheitsnormalprofile über längere Uferstrecken liegen nicht im Sinne einer naturnahen Flusslandschaft. Der grössere Aufwand für Projekt und Baubegleitung gegenüber dem konventionellen Vorgehen kann allerdings kompensiert werden, indem bei der Bauausführung auf Perfektion und unnötigen Aufwand verzichtet wird. Vorsorglicher Unterhalt und angepasste, tendenziell leichtere Verbauungen dienen der Erhaltung der Flusslandschaft besser und sind weniger kostspielig als ein überdimensionierter Uferschutz, der durch seine massiven Bauelemente ins Auge sticht.

Adressen der Verfasser: Dr. *Andreas Huber*, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH, CH-8092 Zürich, und Dr. *Heinz W. Weiss*, Basler und Hofmann, Ingenieure und Planer, Forchstrasse 395, CH-8029 Zürich.

Projektbegleitung: Dr. *Alex Lässker* und *Urs Fröhlich*, Amt für Umweltschutz und Wasserwirtschaft des Kantons Thurgau, CH-8500 Frauenfeld.

Literatur: *Gesamtbericht «Wellenerosion am Rhein»*, VAW-Mitteilung Nr. 88, Zürich 1986, 248 Seiten.

Erfahrungen beim Brunnenbau

Karl Heinrich Meyer

1. Allgemeines

Die ausführende Unternehmung wie auch der projektierende Ingenieur werden bei der Erstellung jedes neuen Brunnens immer wieder vor neue, oft schwierige Aufgaben gestellt.

Die Ursachen solcher Schwierigkeiten können verschiedener Natur sein. Ob hydraulisch, bodenmechanisch, bohrtechnisch oder chemisch bedingt, immer wird es dabei darauf hinauslaufen, dass im richtigen Zeitpunkt die richtige Entscheidung getroffen wird. Die Bodenstruktur, in der deutschen Brunnenbauersprache das «Gebirge», ist ein heikles, komplexes Gebilde, das bei unsachgemässer Behandlung irreversible Schäden davontragen kann, die sich auf eine langjährige Nutzung des Grundwasserträgers auswirken können.

Es ist zu unterscheiden zwischen Leistungsbrunnen und nur kurzzeitig wirkenden Fassungen für Wasserhaltungen von Baugruben.

Nicht jede Bauunternehmung verfügt über den erforderlichen, manchmal entscheidenden Erfahrungsschatz für den Bau von Leistungsbrunnen. Es ist Aufgabe des beratenden Ingenieurs oder Ingenieurgeologen, die richtige Auswahl an ausgewiesenen Unternehmungen zu treffen, um bereits im Offertstadium klare Voraussetzungen zu schaffen. Nachstehende Anregungen aus der Praxis entstammen der Erfahrung von zahlreichen Brunnenbaustellen im In- und Ausland, bei denen zum Teil heikle Entscheidungen zu fällen waren.

Manchmal konnte nur ein schrittweises Vorgehen den Erfolg sicherstellen. In allen Fällen handelt es sich um Leistungsbrunnen, für die eine möglichst lange «Lebensdauer» angestrebt wird, nicht aber um Brunnen für die Wasserhaltung von Baugruben und dergleichen. Die Böden, in denen die Vertikal- und Horizontalfilterbrunnen für sehr unterschiedliche Entnahmemengen projektiert und gebaut wurden, waren sehr verschiedenartig.

2. Auswahl der Bohrunternehmungen

Der Maschinenpark einer Bauunternehmung allein ist nicht massgebend für einen erfolgreichen Bau von Leistungsbrunnen. Viele Unternehmungen setzen Pfahlbohrmaschinen ein. Diese eignen sich ohne weiteres zum Bohren von Brunnen bis zu einem gewissen Durchmesser. Zum Gerät gehört aber ein erfahrener Maschinist sowie ein gut ausgewiesener Bohrmeister, dem Qualität vor Quantität geht. Diese Forderung ist unter dem heutigen Konkurrenzdruck oft sehr schwer aufrechtzuerhalten, denn die Arbeitsvergebung stützt sich fast immer auf öffentliche oder beschränkte Wettbewerbe. Die letztlich entscheidenden Gremien der Bauherrschaft sind gezwungen, auf die billigeren Offertsteller zu tendieren. Gerade in diesem Stadium kommt dem beratenden Ingenieur eine grosse Verantwortung zu.

Bis zu einem gewissen Grad lassen sich unerwünschte Billigofferten durch einen geeigneten Aufbau der Offerte abfangen. Schwieriger wird es, wenn sich lokale Unternehmungen neben örtlichen politischen Vorteilen auf ihre ausführungstechnischen Erfahrungen berufen, die sie bereits früher in den zu durchfahrenden Böden sammeln konnten. Dem beratenden Ingenieur wird es dabei meist schwerfallen, solche Vorteile für seine Zwecke zu bewerten und eine gewisse Routine der Unternehmung von früheren Brunnenbaustellen her bei der Vergabe als mitentscheidend zu werten oder sie zu entkräften.

Noch heikler wird die Beurteilung einer fachgerechten Ausführung, wenn die Brunnenbauarbeiten vom Auftraggeber an Drittunternehmungen weitervergeben werden. Dies ist meistens statthaft, entzieht aber dem beratenden Ingenieur oft weitgehend die Grundlage, im Offertstadium die Chancen einer kompetenten Bauausführung richtig zu beurteilen.

3. Geologie, Hydrogeologie

Die Bohrungen zur Erkundung des Untergrundes vor einer eigentlichen Brunnenbohrung bringen im Normalfall eine Bestätigung der Projektannahmen des Hydrogeologen. Hin

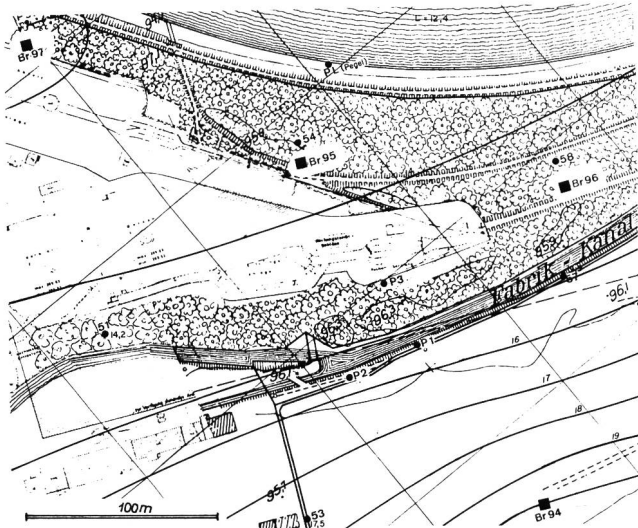


Bild 1: Situation der Versuchsbrunnen 94, 95, 96 und 97 mit Kurven gleicher französischer Härtegrade.

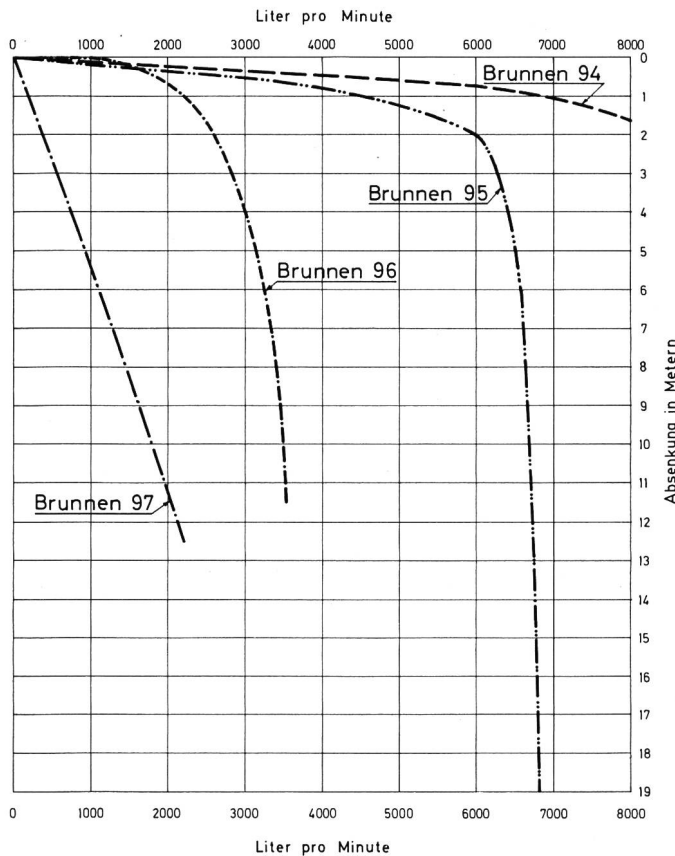


Bild 2. Ergiebigkeit der Brunnen 94, 95, 96 und 97 beim Simultanpumpen. Obwohl die Brunnen nahe beieinander liegen, haben sie stark verschiedene Ergiebigkeit.

und wieder bringen sie jedoch auch Überraschungen an den Tag, sei es hydrologisch, geologisch, chemisch oder mit Problemen für die Brunnenbautechnik. Sobald wesentliche technische Funktionen oder die Sicherheit von Anlagen von der Brunnenleistung abhängen, macht sich die vorherige Abteufung eines Versuchsbrunnens bezahlt. Anhand einiger Beispiele aus der Praxis wird verdeutlicht, mit welchen Problemstellungen der Projektverfasser fertig werden muss.

Über dem Grundwasserträger lassen sich die Schichtfolgen eines Bohrprofils auch in gestörtem Zustand noch verhältnismässig gut bodenmechanisch interpretieren. Sobald aber die Bohrung in den Grundwasserträger eindringt, wird es schwieriger, das entnommene Bohrgut einigermaßen sicher zu beurteilen. Je nach Bohrmethode – diese hängt oft vom Maschinenpark der Unternehmung ab – lässt sich der Feinkornanteil nur schwer bestimmen. Damit wird die Bestimmung einer repräsentativen Kornverteilungskurve schwierig; gerade in dem Körnungsbereich, welcher massgebend wird für die richtige Wahl des Aufbaus der Filterpackung zwischen Bohrrohr und Filterrohr, besteht die grösste Unsicherheit.

In neuester Zeit ist man dazu übergegangen, in Piezometerbohrungen mit «Flowmeter»-Versuchen den spezifischen Wasserzufluss in der Schichtenfolge eines Bodenprofils nachzuweisen. Im Prinzip geht es dabei um die Messung der Verteilung des Grundwasserzuflusses über das Bohrprofil zu einer Fassung, indem bei Entnahme aus dem Piezometer die Verteilung der vertikalen Fließgeschwindigkeiten über die gesamte wasserführende Tiefe gemessen wird. Damit werden die wesentlichen wasserführenden Schichten festgestellt.

Bei grösseren hydraulischen Gradienten hat man im Ruhezustand bei verrohrtem Brunnen festgestellt, dass in stark wasserführenden Horizonten die Durchströmung des Brunnens so gross ist, dass sogar feinkörnige Feststoffe quer durch das Filterrohr hindurchgeschwemmt werden. Es ist nicht eindeutig abgeklärt, wie weit sich hierbei der präferentielle Fliessweg durch die Bohrung ohne den örtlich entfallenden Fließwiderstand im Bodengefüge bemerkbar macht. Immerhin hat man eindeutig den Eintritt und Austritt von Grundwasser und Feinteilchen in Brunnenrohren, d. h. eine starke Durchströmung senkrecht zur Brunnenachse, nachgewiesen.

In einem Versuchsfeld im Limmatschotter, das nach hydrogeologischen Gesichtspunkten ausreichend erbohrt ist, wurden mehrere Versuchsbrunnen in Abständen von 140 m bis 160 m abgeteuft (Bild 1). Alle Brunnen wurden nach der gleichen Baumethode erstellt und haben denselben Aufbau. Trotzdem sind ihr Verhalten und ihre Ergiebigkeit unterschiedlich (Bild 2). Die Untersuchung verschiedener chemischer Parameter gibt verlässliche Hinweise darauf, dass das Grundwasser bei allen 4 Brunnen aus derselben Richtung stammt. Es handelt sich also eindeutig um lokale geologisch bedingte Unterschiedlichkeiten gewisser Zonen im Grundwasserträger auf engem Raum.

Wenn man vergleichsweise hierzu Angaben hydrogeologischer Untersuchungen aus Projekten in Entwicklungsländern zu beurteilen hat, wo oft der Abstand zwischen zwei Bohrungen mehrere Kilometer beträgt, wird einem das Risiko bei der Interpretation oder sogar einer Interpolation zwischen vorliegenden Werten erst recht bewusst. Ganz zu schweigen vom Aussagewert der Resultate selbst.

4. Versuchsbrunnen

Ein Versuchsbrunnen soll ebenso sorgfältig erstellt werden wie ein Leistungsbrunnen. Auch für den Bau von Versuchs-

brunnen wird der Wahl der ausführenden Unternehmung und des Bohrgerätes besondere Aufmerksamkeit geschenkt. Auf Rekordleistungen beim Abteufen der Bohrungen wird kein Wert gelegt.

Die Bauarbeiten werden im allgemeinen aufgrund beschränkter Wettbewerbe unter den erfahrensten Brunnenbaufirmen vergeben. Die Erstellungskosten werden in erträglichem Mass beeinflusst durch umfangreiche hydrogeologische Untersuchungen und Prüfungen während der Erstellungsphase. Die Feldversuche sind hauptsächlich darauf ausgerichtet, die richtige Abstufung der Körnung der Filterschüttung und die Schlitzweite der Filterrohre festzulegen. Es hat sich nämlich herausgestellt, dass auch in Schotterböden oft übermässig viele Feinanteile aus der Sandfraktion enthalten sind. Die angewandte Bohrmethode erlaubt meist keine exakte Bestimmung des Anteils dieser Körnung an der gesamten Kornverteilung. Schwierigkeiten treten oft durch erhöhte Restsandführung auf.

Der spätere Verwendungszweck der Versuchsbrunnen beeinflusst die Wahl der Verrohrung. In jedem Fall soll der Typ der Lochung demjenigen entsprechen, der für die definitive Lösung vorgesehen ist. Im allgemeinen wird man bei Metallfiltern für Versuchsbrunnen jedoch nicht über die Qualität verzinkter Stahlrohre hinausgehen.

Wurde früher die Entsandung nach dem Abklingen einer gewissen Resttrübung als ausreichend beurteilt, so ist man heute der Ansicht, dass erst eine einwandfreie Entsandung im Versuchsbrunnen eindeutige brunnentechnische Ergebnisse liefern kann. Dies gilt übrigens auch für die Wahl zusätzlicher Entsandungsmethoden wie z. B. das Schocken mit Wasser oder Wasser-Luft-Gemisch.

5. Brunnenbau

Die nachstehenden Überlegungen gelten vor allem für Leistungsbrunnen zur Wasserversorgung. Brunnen für Zwecke der Wasserhaltung werden nicht in die Überlegungen miteinbezogen. Ihre Einsatzdauer beträgt meist nur wenige Jahre, und ein Leistungsabfall spielt bei ihnen kaum eine Rolle, solange die Entwässerungswirkung ausreicht.

5.1 Vertikalfilterbrunnen

Schon die Wahl des richtigen Bohrgerätes stellt manchmal für den Projektverfasser grössere Probleme als für den Unternehmer. Letzterer will zuerst seinen eigenen Maschinenpark einsetzen. Wenn er über das geeignetste Bohrgerät für den vorgesehenen Einsatz verfügt, ist das oft zufällig. Je nach Bohrdurchmesser, Bohrtiefe und Beschaffenheit des Untergrundes kann man im Preis sehr unterschiedliche Geräte verwenden. Entsprechend fällt auch der kalkulierte Offertpreis für den Laufmeter Bohrung billiger oder teurer aus. Hin und wieder allerdings erscheinen in den Angeboten unerklärlich tiefe Einheitspreise für Leistungen, die rein kalkulatorisch wesentlich teurer anzubieten wären. Der Grund dafür ist meist, dass eine Maschine ausgelastet werden soll, die für teurere Leistungen konzipiert ist. Innerhalb eines gewissen Spielraumes ist der Einsatz mehrerer Bohrgeräte wahlweise möglich.

Beim Bohren der Brunnen gibt ab und zu die Tiefe der Teleskopierung Anlass zu Diskussionen. Bohrungen grossen Kalibers beanspruchen die Maschine besonders in rolligen Böden recht stark, so dass die Unternehmung die Tendenz hat, früh auf kleinere Bohrdurchmesser umzustellen. Es bedarf einiger Routine bei der Beurteilung, ob eine Bohrmaschine mit zunehmender Bohrtiefe bei einem gewissen Kaliber an der Grenze ihrer Leistungsfähigkeit angelangt ist. Auch die Routine des Maschinisten darf nicht unerwähnt bleiben; in kritischen Fällen kann sie entscheidend zum gu-

ten Gelingen der Bohrung ohne Teleskopieren beitragen. Beim Bau von Leistungsbrunnen sollten möglichst keine tixotropen Materialien zur Schmierung oder Stützung der Bohrlochwand verwendet werden. Es muss sonst viel intensiver entsandet werden, damit auch die eingespülte Tontrübe wieder ausgewaschen wird. Der heterogene Bodenaufbau der Grundwasserträger begünstigt eine unkontrollierte Ausbreitung solcher Feinstkomponenten. In einem Fall lag die Ergiebigkeit eines Brunnens trotz Entsandung wesentlich unter der zu erwartenden Fördermenge. Nach eingehender Überprüfung aller möglichen Ursachen fand man schliesslich als einzige Möglichkeit eine 15 bis 20 m entfernt davon gebaute Schlitzwand, die selbst kaum in den Grundwasserträger hineinreichte. Eindeutig konnten jedoch verirrte Bentonitspuren nachgewiesen werden, die von der Dickspülung der Schlitzwand herrührten.

Das Durchfahren verkitteter Nagelfluhbänke oder sogar von Felsblöcken ist technisch lösbar, bleibt aber immer eine Kostenfrage. Bohrtechnisch schlimmer wird es, wenn Blöcke mit einer Bohrung nur teilweise angefahren werden. Meist hilft in diesem Fall nur eine lokale Sprengung, die auch unter Wasser ausgeführt werden muss. Neben den damit verbundenen Kosten besteht eine gewisse Gefahr, dass dadurch örtlich Kavernen gelockert werden und besonders unter Wasser nachstürzen. Sprengungen kommen aber nur bei Bohrdurchmessern in Betracht, die den Einsatz eines Tauchers zulassen.

Strebt man den Bau eines vollkommenen Brunnens an, ist die Bohrung bis auf den undurchlässigen Untergrund abzuteufen. Oft ist es nicht einfach, diesen als solchen zu erkennen, da selbst bei Erreichen von Fels das Bohrgut zum Teil so stark zerarbeitet wird, dass dieses weitgehend abgerundet gefördert wird, was eine eindeutige Feststellung des Erreichens des Felsuntergrundes erschwert.

Bei der Wahl des Filtertyps und -materials spielen häufig persönliche Erfahrungen des Bauherrn oder des Ingenieurs eine grosse Rolle, aber auch Geschäftsinteressen und Vergabepolitik. Sind die Bodenkenngrössen und der Grundwasserchemismus bekannt, bleibt noch immer ein breites Feld verschiedener verwendbarer Filter zur Auswahl. Die Öffnungsweiten im Filter sind in Funktion von der Bodengranulometrie und der Filterschüttung zu wählen. Danach wird die spezifische Eintrittsfläche in den Filter ein Kriterium zur Auswahl. Weitaus am besten schneidet dabei der Johnson-Filter ab, und zwar vor dem Schlitzbrückenfilter mit Hochleistungslochung. Abgesehen von gewissen Trends, welche zahlreiche Typen von Filtern – Kiesklebefilter, Horizontalschlitzfilter, Gardelochung, Jalousielochung, Längsschlitzlochung, Rundlochung, Filter aus verschiedenen Plastikmaterialien – auf dem Markt gebracht haben, die zum Teil nach kurzer Zeit wieder verschwinden, eignen sich in gewissen Böden gewisse Filtertypen besser und andere weniger gut.

Je nach Chemismus des Grundwassers werden verschiedene Rohrmaterialien verwendet (Tabelle 1). Edelstahllegierungen werden eingesetzt für Schlitzbrückenfilter, Johnson-Filter oder ähnliche. In aggressiven Wässern können aber auch mit Polyamid überzogene Stahlrohre verwendet werden. Allerdings ist dabei sehr auf Qualität zu achten. Die bei ihnen zum Teil auf der Baustelle festgestellten Transportschäden an der Beschichtung sind sowohl auf die Herstellung selbst wie auch auf mangelhafte Behandlung beim Transport zurückzuführen.

Kiesklebefilter verschiedener Bauart sind in unseren Böden mit sehr heterogenen Schottern weniger gebräuchlich. Sie sind unter Umständen jedoch bei genauer Kenntnis der Bodengranulometrie eine geeignete Methode, einen Filter mit

Tabelle 1. Übersicht über gängige Filtermaterialien

Filtermaterial	Kaliberbereich	Lochungsart	Schlitzweite
Beton	1000mm	Schrägschlitz	10mm
Asbestzement	500mm	Rundloch	10mm
		Langloch	10mm
Metall (Stahl, Edelstahl)	1500mm	Rundloch	6mm
		Langloch	6mm
Kupfer		Schlitz	1 bis 12mm
Bronze		Schlitzbrücken	1,0 bis 4,0mm
Aluminium		Garde	10mm
Mondmetall		Jalousie	1,0 bis 4,0mm
		Johnson u. a.	0,25 bis 3,7mm
Stahl mit Nylonüberzug	1000mm	Schlitzbrücken	1,0 bis 4,0mm
PVC	200mm	Schlitz	0,2 bis 2,0mm
Polyester	400mm	Schlitz	1,5mm
Holz, Kunstharz behandelt	500mm	Schlitz	1,0 bis 4,0mm
Steinzeug	300mm	Schrägschlitz	10mm

exakter Packung und Abstimmung auf die Lochung bereits im Werk herzustellen. Ihre Regenerationsfähigkeit ist verglichen mit geschütteten Filtern weniger gut.

Der Erfolg von kunstharzgetränkten, plastifizierten Holzfiltern mit Längs- oder Querschlitz ist trotz der Eignung des Werkstoffes auch bei aggressiven Wässern ausgeblieben. Grösster Nachteil ist wohl die kleine spezifische Öffnung solcher Filter.

Kunststofffilter, namentlich aus PVC, finden hauptsächlich in Kleinbrunnen bis zu 8" Durchmesser Anwendung. Sie sind mit Längs- oder Querschlitzlochung erhältlich. Polyesterfilter konnten sich trotz guter Materialeigenschaften nicht durchsetzen.

Es wird dem beratenden Ingenieur oft schwer gemacht, das geeignetste Profil und Material für das Filterrohr zu verwenden, da besonders für Bauten der öffentlichen Hand das Kriterium des tiefen Preises entscheidend ist. Es gilt aber zu bedenken: der Einfluss einer Preisdifferenz beim Filtermaterial auf die gesamten Gesteungskosten ist bescheiden. Allein ein unvernünftiges Vorgehen beim Entsanden oder unvorhergesehene Erscheinungen beim Pumpversuch können den Preisunterschied beim Material ohne weiteres aufwiegen. Dem Johnson-Filter ist eine Sonderstellung einzuräumen. Er und die ihm nachgebauten Fabrikate aus Edelstahl weisen mit Abstand das günstigste Verhältnis von Eintrittsöffnung zu Oberfläche auf. Das wirkt sich auch auf die Langzeitentwicklung des Brunnens günstig aus.

Die Filterkiesschüttung, welche konzentrisch in die Brunnenbohrung um das vorher abgesetzte Filterrohr eingebracht wird, verdient nicht weniger Aufmerksamkeit als die Wahl des richtigen Filters. Ihr ein- oder mehrschichtiger Aufbau gewährt bei richtiger Dimensionierung den bestmöglichen Übergang vom natürlichen Bodengefüge zum Filter.

In mittelfeinen Sandböden wird auch heute noch der ausen um ein gelochtes Filterrohr aufgezugene Gewebefilter aus Metallfäden verwendet. Qualitativ können Köpergewebe und Tressengewebe als gleichwertig bezeichnet werden; letzteres ist jedoch schwer zu reinigen. Im Interesse einer langen Lebensdauer sollte kein zu engmaschiges Gewebe gewählt werden, da sonst eine Entsandung unmöglich ist.

DIN 4924 enthält die wesentlichen Kriterien für Filtersande und -kiese:

- ausschliesslich Verwendung von natürlichem Sand und Kies
- möglichst Körner mit kugelförmiger Form, kein gebrochenes Material
- glatte Kornoberfläche
- möglichst aus reinem Quarz ($\geq 96\%$) weniger als 4% artfremde Stoffe

– Einhaltung der geforderten Toleranzen der Anteile an Über- und Unterkorn

- Transport in sauberen Behältern;
- einwandfrei gewaschenes Material.

Es gibt nur wenige Bezugsorte für natürliches Material, das all diesen Bedingungen genügt. Das wirkt sich auf den Preis für Filtersand aus. Deshalb weicht man oft auf lokales Material aus, das die meisten der obigen Bedingungen erfüllt. Glatte, kugelige Korn ohne gebrochene Anteile findet sich vielerorts. Schwieriger wird es, geologisch bedingt, fast reines Quarzmaterial auszubeuten. Die Schweiz muss solches Material aus dem Ausland beziehen. Nicht-Quarz-Material enthält, auch mehrmals sorgfältig gewaschen, Verunreinigungen durch Steinmehl, das bei Transport, Umschlag und Einbau laufend neu entsteht.

Das Abteufen der Bohrung und das Versetzen der Filterrohre soll senkrecht in den Untergrund, gerade und als Kreiszyylinder erfolgen. Das ist besonders bei Tiefen über 20 m nicht ganz selbstverständlich. Im Endzustand soll das Filterrohr konzentrisch in der Bohrung eingebaut werden. Bei Brunnen grösserer Tiefe ist es vermessungstechnisch gar nicht einfach, die Rundheit des Rohres nach dem Einbau sowie seine Abweichung von der Achse nachzuweisen. Schwierigkeiten können bei nicht senkrecht gebauten Brunnen entstehen, wenn mehrere Pumpen und Förderleitungen im Schacht versetzt werden und sich diese beim Ziehen gegenseitig behindern, indem die Rohr- und Pumpenflanschen ständig aneinander anhängen. Wird nur eine einzige Pumpe eingesetzt, so besteht die Gefahr, dass die Flanschen an der Brunnenwand reiben, was beschichtete Filter beschädigen kann; der Schaden kann nur mit der Fernsehkamera entdeckt werden.

Ein Ausgleich zwischen Bohrung und fertig versetztem Filterrohr ist nur beschränkt möglich, denn dadurch geht die konzentrische Anordnung der Filterkiesschüttung verloren. Die richtige Körnung für Filtersande und Filterkiese wird aufgrund von Erfahrung oder genauer anhand sorgfältiger Siebanalysen der erbohrten Sande und Kiese ausgewählt. Dabei darf insbesondere das Fein- und Feinstmaterial nicht verloren gehen. Das bedingt die Verwendung von Greifern, Ventilbohrern, Schlammbüchsen oder Kiespumpen zur Entnahme des Bohrgutes sowie dessen Sammeln in einem grösseren Gefäss. Der Rest der Genauigkeit der Ergebnisse fällt in den Sektor der Erdlabortechnik. Erst nach Vorliegen

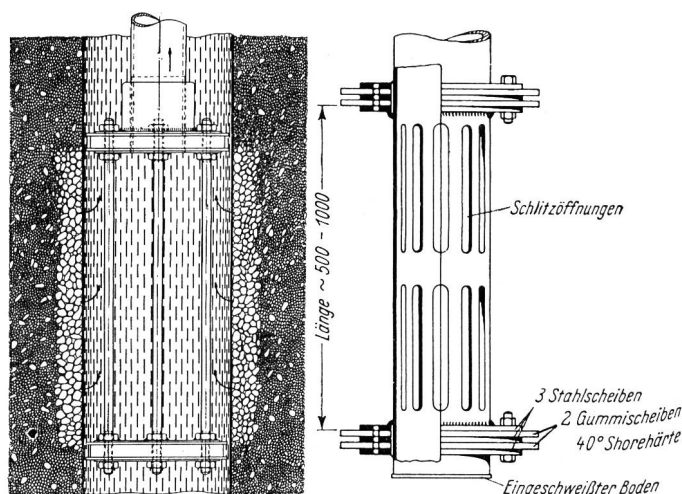


Bild 3. Entsandungsseiherrahmen, links, und rechts Entsandungsseiherrahmen nach Trouelsen (aus Nold-Brunnenfilterbuch, 4. Auflage, J.F. Nold & Co., D-6081 Stockstadt am Rhein, 1968, S. 162, Abb. 145 und 146).

von seriös ermittelten Kornverteilungskurven hat es einen Sinn, irgendwelche Filterkriterien anzuwenden. Bei grobkörnigen Böden wird man dabei mit einer einfachen Filterschüttung ans Ziel gelangen, wogegen feinkörnigere Böden oft zweistufige Filterschüttungen erforderlich machen. Bei der Wahl teurer Quarzfiltersande und -kiese ist man aus terminlichen und wirtschaftlichen Gründen gezwungen, ein möglichst genaues Vorausmass zu erstellen. Kavernen, die sich beim Bohren im Untergrund gebildet haben, können einen spürbaren Anteil des für die Ummantelung des Filterrohres gedachten Materials schlucken. Dieses fehlt dann bei der Hinterfüllung im oberen Bereich, sofern nicht für genügend Reservematerial gesorgt wurde.

Nach dem Einbau des Filterrohres und dem Einbringen der Filterkiesschüttung muss der Brunnen mit Hilfe einer Entsandungspumpe entwickelt werden. Dabei werden zonenweise aus dem umliegenden Gestein feine und feinste Kornanteile durch die Schleppkraft des Wassers in den Brunnen gespült und abgepumpt. Dadurch wird rund um den Brunnenfilter das Porenvolumen vergrössert und der Fliesswiderstand verringert bzw. eine Erhöhung der Zuflussmenge je Zeiteinheit erreicht.

Die früher als genügend erachtete Entsandung durch gesteigerte Wasserförderung bis jeweils zum Verschwinden der letzten Resttrübung wird heute in den meisten Böden als kaum mehr genügend erachtet. Hauptschwäche dieses Verfahrens ist das Anströmen des Brunnens über präferenzielle Schichten, die ohnehin wenig Feinkorn enthalten. Diejenigen Schichten mit viel Feinkorn und besonderer Entsandungsbedürftigkeit dagegen können auf diese Weise nicht genügend ausgewaschen werden. Man erreicht das angestrebte Ziel nicht, rings um die Kiesfilterschüttung das Feinkorn auszuspülen.

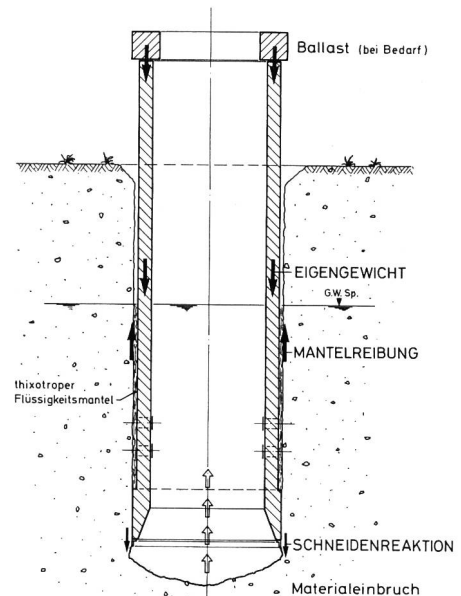
Eine gewisse Verbesserung der Entsandung lässt sich durch das «Schocken» erzielen, ein wiederholtes Anfahren und Abschalten der Entsandungspumpe. Die Wirksamkeit hängt von der erzielten Eintrittsgeschwindigkeit ab. Meist kann man mit einem Takt von 5 bis 6 An- und Abschaltungen je Stunde arbeiten und steigert allmählich die Fördermenge. Während das Schocken sich weitgehend an die hydrogeologischen Gegebenheiten anpasst und aus weniger durchlässigen Schichten weniger grosse Eintrittsgeschwindigkeiten in den Filter bringt, erreicht man mit dem zonenweise eingesetzten Entsandungsseier (Bild 3) ein sehr gezieltes, gründliches Auswaschen in beliebig wählbaren Schichten des Grundwasserträgers. Man fährt dazu mit dem Gerät abschnittsweise von unten nach oben im Filterrohr und versetzt es jeweils nach genügender Entsandung in die nächste Position. Vorteilhaft ist die verhältnismässig geringe Fördermenge im Vergleich zum örtlichen Entsandungseffekt.

Es ist auch bei diesem Verfahren angebracht, mit einer Steigerung der Förderleistung zu arbeiten, um die Bodenstruktur zu schonen.

Sollte auch diese Methode noch keine zufriedenstellende Entsandung bringen, so versucht man stossweise mit Änderung der Fliessrichtung zum und vom Filter Saug- und Druckstösse zu erzeugen, welche allfällige Brückenbildungen im Boden um den Filter zerstören und auflösen. Im Prinzip ist dies nur eine wirksamere Form des An- und Abschaltens der Pumpe, bei dem sich auch Strömungen zum Brunnen und davon weg aufbauen, allenfalls unterstützt von rasch zugeleiteten grösseren Wassermengen in das Filterrohr.

Dazu wird zonenweise mit einem Entsandungskolben die gesamte Filterlänge gespült. Bei Bedarf kann die Beimengung von Druckluft zum Spülwasser den Entsandungs- und Lockerungseffekt noch verstärken. Die Restsandmenge

Bild 4. Kräftespiel am Senkschacht.



wird zweckmässigerweise im Imhofrichter kontrolliert. Nach dem Abschluss der Entsandung wird mit einer Förderpumpe genügender Leistung der Pumpversuch durchgeführt. Ziel und Zweck des Versuches ist es, die Leistung des Brunnens nachzuweisen und dabei das Verhalten des Grundwasserträgers zu erkennen. Man geht hierfür in mehreren Leistungsstufen bis zur angestrebten Entnahmemenge. In jeder Teilstufe versucht man, den Beharrungszustand des Grundwasserspiegels zu erreichen.

Manchmal ist es nicht einfach, den Beharrungszustand zu erkennen, da meteorologische und hydrogeologische Einflüsse die Beobachtungen überlagern.

Die Leistungsfähigkeit der Fassung, die Ergiebigkeit des Grundwasserleiters und die Durchlässigkeit, Transmissibilität und der Speicherbeiwert des Grundwasserleiters werden genau ermittelt. Der Pumpbetrieb ist verhältnismässig teuer. Es lohnt sich deshalb, die Versuche möglichst genau zu planen. Je nach Fördermenge und Möglichkeit seitens der Pumpe versucht man, in 3 bis 5 Stufen auf die angestrebte Entnahmemenge oder sogar darüber zu kommen. Die Auswertung der Versuche kann nach verschiedenen Methoden vorgenommen werden. Es empfiehlt sich, zu Vergleichszwecken einen Versuch immer mindestens auf zwei verschiedene Arten auszuwerten.

Zeigt sich beim Pumpversuch, dass die angestrebte Leistung des Brunnens nicht erreicht wird, so ist es aus wirtschaftlichen Gründen ratsam, sofort noch einmal eine intensivere Entsandung vorzunehmen und nicht teure und langdauernde Pumpexperimente abzuwickeln.

5.2 Horizontalfilterbrunnen

Ausgangspunkt für den Einbau von horizontalen Filtersträngen im Grundwasserträger ist für alle bekannten Verfahren ein Schacht, wie er für eine Brunnengründung erstellt wird. Früher meist in Caissonbauweise, heute fast nur noch als offener Senkkasten abgeteuft, wird im Schutz der Schachtkonstruktion durch ein Wechselspiel von Materialentnahme und Grundbruch in der Sohle der Bohrung das Absenken des über Terrain hergestellten Schachtes erreicht. Dies geschieht durch geschicktes Kräftespiel zwischen Eigengewicht und Reaktion an der Schneide unter Einbezug von Auftrieb und Mantelreibung. Das Eigengewicht wird durch die zu Beginn gewählte Wandstärke und die übrigen Schachtdimensionen geregelt. Zusätzlich kann bei Bedarf zur Feinregulierung Ballast aufgesetzt werden. Die Mantelreibung wird durch thixotrope Schmiermittel entlang der Aussenwand beeinflusst. Die Kräfte an der

Schneide können praktisch kaum beeinflusst werden, da eine völlige Freilegung der Schneide selbst unter Wasser nicht realisierbar ist.

Sehr unangenehm sind beim Absenkvorgang angetroffene einseitige Hindernisse, die oft nur durch Sprengen beseitigt werden können. Dies birgt gewisse Gefahren in sich, da der Senkbrunnen unvermittelt und unkontrolliert wieder in Bewegung geraten kann und dabei auf Taucher im Einsatz plötzliche Druckwellen einwirken können. Das Vorhandensein ganzer Schichten, die den Absenkvorgang hemmen, sollte durch die vorgängigen Aufschlussbohrungen ausreichend abgeklärt sein. Mit ihrer Hilfe müssen auch die endgültige Tiefe des Brunnenschachtes und die Lage der Filterhorizonte sowie Anzahl und Richtung der Stränge vor dem Baubeginn festgelegt werden.

Nach dem Einbringen der Schachtsohle werden die Horizontalfilterstränge im Pressvortrieb eingebaut. Ihre Länge beträgt zwischen 10 und 35 m, je nach Geologie und technischen Möglichkeiten. Grundsätzlich gibt es auch heute noch zwei Verfahren zum Einbringen horizontaler Filterstränge:

- das Ranney-Verfahren verwendet das Bohrrohr gleichzeitig als Filterrohr
- beim Fehlmann- und Preussag-Verfahren zieht man das Bohrrohr nach dem Einsetzen des Filterrohres, wobei der Pilotkopf verloren geht.

Im ersten Fall bildet sich um das Bohrrohr herum ein natürlicher Kiesfilter bis zu über einem Meter Durchmesser.

Im Fall des Fehlmann-Verfahrens und des durch Preussag auf feinkörnige Böden erweiterten Prinzips baut sich der Kiesfilter um das Filterrohr herum auf, beim Preussag-Verfahren über einer eingeschwemmten Kiesschüttung.

In den voralpinen Schotterböden hat sich das Fehlmann-Verfahren als erfolgreich erwiesen. Die Stränge werden mit Kalibern von 215 und 365 mm gebohrt und mit den ihnen entsprechenden Filterrohren von 170 und 300 mm ausgerüstet. In den Schächten mit lichtem Innendurchmesser von 4,0 m werden bis zu 3 Filterhorizonte vorgesehen, die jedoch anfangs erst teilweise erbohrt werden.

Der Rest ist als Reserve bei Rückgang der Brunnenleistung zu betrachten. Die Gesamtlänge der Filterstränge je Brunnen beträgt zwischen 300 und 480 m.

Als Filterrohre werden Schlitzbrückenfilter aus Edelstahl 4301 verwendet sowie Lamellenfilter aus Polypropylen.

Die Entsandung kann in zwei Phasen unterteilt werden. Während des Bohrvortriebes wird durch dauerndes Ausspülen in der Pilotpartie mit Druckwasser und Druckluft gearbeitet bis klares, sandfreies Wasser in den Schacht eintritt. Nach dem Filtereinbau wird an jedem Fassungsstrang eine Pumpe montiert, mit deren Hilfe nach dem Schock-Verfahren stossweise entsandet wird. Die Pumpleistung wird dabei auf rund das Doppelte der pro Strang erwarteten Ergiebigkeit gesteigert.

Der abschliessende Leistungspumpversuch bestätigt jeweils gesamthaft die erfolgreich verlaufene Entsandung. Da es sich bei Horizontalfilterbrunnen fast ausnahmslos um Grossfassungen handelt, wird in diesem Zusammenhang in erster Linie die Auswirkung auf das weiterreichende Grundwasserfeld sowie auf andere Fassungen untersucht. Für die Überwachung des Verhaltens des Grundwasserträgers im Einflussbereich des Horizontalfilterbrunnens soll die ganze weitere Umgebung vor, während und nach dem Leistungspumpversuch beobachtet werden. Als Beobachtungspunkte kommen sowohl bestehende Einrichtungen wie eigens dafür gebohrte Piezometer in Frage. Meist ist aus der Phase der Vorabklärungen der Filterhorizonte eine aus-

reichende Anzahl Bohrungen verfügbar, so dass kaum zusätzliche Punkte erschlossen werden müssen.

5.3 Abschlusskonstruktion der Brunnen

Beim Vertikalfilterbrunnen als Brunnenkopf geläufig, beim Horizontalfilterbrunnen etwas präziser als Abschluss des Brunnenschachtes bezeichnet, handelt es sich in beiden Fällen darum, eine möglichst dichte und zuverlässige Konstruktion um das obere Ende des vertikalen Rohres zu bauen. Diese soll verhindern, dass Verschmutzungen irgendwelcher Art entlang der vertikalen Wandung als präferenziellem Sickerweg in die Fassung gelangen und das meist keimarme Grundwasser für den Genuss als Trinkwasser in Frage stellen.

Als Dichtungsmaterial kommen Beton oder Ton in geeigneter Form in Betracht. Der gesamte Hohlraum zwischen der grössten Bohrlochwand und dem Filteraufsatzrohr ist satt und sorgfältig damit zu verfüllen. Darunter wird mit dem vorhandenen Bohrgut aufgefüllt, sofern dies sich dazu eignet, oder mit Wandkies. Der bleibenden Elastizität wegen ist meist eine Lösung mit tonigem Material vorzuziehen. Auch für Versuchsbrunnen soll gleich vorgegangen werden, denn es geht ja in erster Linie darum, das Grundwasser keimfrei zu halten.

Es ist schon vorgekommen, dass aus einem Brunnen mit 50 m Tiefe bei einem Grundwasserspiegel 35 m unter Terrain jahrelang erhöhte Keimzahlen, ja sogar koliforme Keime im geförderten Grundwasser beobachtet wurden, weil die Abdichtung um das Filteraufsatzrohr nicht als notwendig erachtet worden war.

Von einer Verwendung von Lehm zur Abdichtung ist dringend abzuraten, obwohl dies häufig die kostengünstigste Variante ist. Insbesondere bei hohem Grundwasserspiegel besteht die Gefahr der Auflösung zu breiiger Konsistenz und damit verbundener Trübung des Grundwassers. Gleichzeitig baut sich damit der Dichtungseffekt laufend ab. Der Ersatz einer falsch konzipierten Abdichtung oder das spätere Einbauen, falls eine solche fehlt, ist kostspielig.

Sobald ein Brunnen eine gewisse Grösse und Bedeutung hat, ist es angezeigt, den Abschluss auf dem Terrain in einem Vorschacht vorzusehen. Neben der Ausschaltung der oben beschriebenen Probleme bringt dieser gleichzeitig noch wesentliche betriebliche Erleichterungen mit sich. Für alle Abschlusskonstruktionen gilt die Forderung nach grösstmöglicher Sicherheit gegen Sabotage und andere äussere Einflüsse, welche die Nutzung des Grundwassers als Lebensmittel in Frage stellen können.

6. Betriebserfahrungen aus der Sicht des Projektgenieurs

Die hydrogeologischen Untersuchungen bezwecken, im Interesse einer langen Lebensdauer der Brunnen, ihren optimalen Betriebszustand bezüglich Entnahmemenge, Absenkung des Grundwasserspiegels und Beanspruchung des Feldes zu ermitteln. Eine vernünftige Sicherheitsmarge bewahrt die Brunnen auch in Perioden niedriger Grundwasserstände vor Übernutzung und beschleunigter «Alterung». Jede Steigerung der Leistung wirkt sich ungünstig auf das Langzeitverhalten aus.

Es gibt Grundwasserfassungen, die über Jahre hinaus nie sandfreies Wasser liefern. Ursachen hierfür sind die Bodenstruktur selbst, ungenügende Entsandung beim Bau, falsche Wahl von Filterrohr oder Filtermaterial, ungünstige Betriebsvoraussetzungen oder das Zusammenwirken mehrerer dieser Ursachen.

Adresse des Verfassers: *Karl Heinrich Meyer*, Elektrowatt Ingenieurunternehmung AG, Postfach, CH-8022 Zürich.