Objekttyp: **AssociationNews**

Zeitschrift: **Schweizer Ingenieur und Architekt**

Band (Jahr): **107 (1989)**

Heft 22

PDF erstellt am: **20.04.2024**

**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.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

**http://www.e-periodica.ch**

**2. Eingabeparameter Nettoregen**

$w$ = 100 Jahre, $D$ = 70 mmh$^{-1/4}$ = 0,009 ms$^{-1/4}$, $d$ = 3/4, $\varphi$ = 0,3 also auch den Gleichungen (19, 24, 26), siehe Beispiele 3 und 4, $t_{01}$ = 4945 s, $\tau_{ext}$ = 0,776, $\alpha$ = -7/6, womit $\tau^{\alpha}$ = 1,344.

**3. Maximal möglicher Ausfluss**

Für $d$ = 3/4 folgt mit Gleichung (42b) $Q_{ext,2}$ = 0,997 · 12,9 · $10^6$ · $3000^{-9/14}$ (0,3 · 0,009)$^{10/7}$ · (15 · 0,34$^{1/2}$)$^{9/14}$ = 64,8 m$^3$s$^{-1}$.

Als zugehörige Steigzeit gilt nach Gleichung (37) $t_{ext,2}/t_{01}$ = 1,21·0,776[1 + 0,25·1,344] = 1,24, also $t_{ext,2}$ = 1,24·4945 = 6120s = 1,7 h. Das resultierende Hydrogramm berechnet sich schliesslich durch Anwendung der Gleichung (14). Bild 9 zeigt die Lösung.

Mit $\tau = \tau_{ext}$ = 0,776 und $t_0$ = 4945s wird $t^* = \tau \cdot t_0$ = 3840s = 1,07 h. Die massgebende Niederschlagsdauer beträgt demnach $t_r$ = (8/5)·1,07 = 1,71 h, womit $\bar{r} = D/t_r^d$ = 46,9 mmh$^{-1}$. Das massgebende Netto-Hyetogramm, charakterisiert durch ($p^*$,$t^*$) = (28,1 mmh$^{-1}$, 1,07 h), ist ebenfalls in Bild 9 eingetragen.

Weiter in Bild 9 gezeichnet sind Netto-Hyetogramme und zugehörige Hydrogramme für $t_r$ = 1 h und $t_r$ = 3 h. Daraus ist ersichtlich, das zwar das Abflussvolumen mit zunehmender Regendauer $t_r$ zunimmt, dass jedoch die Abflussspitze den Maximalwert für $t_r$ = 1,71 h annimmt.

## Schlussfolgerungen

In der vorliegenden Untersuchung wird durch Extremalanalyse dasjenige Regenereignis ermittelt, welches bei vorgegebener Regencharakteristik und bekanntem Einzugsgebiet zum maximal möglichen Abfluss führt. Ausgehend von einem vereinfachten hydrologischen Modell sowie einem Ersatz-Nettohyetogramm werden vorerst Beziehungen abgeleitet, die die direkte Ermittlung des resultierenden Hydrogramms am Ausfluss des Einzugsgebietes erlauben.

Für ein geographisch fixiertes Einzugsgebiet und eine angenommene Wiederkehrperiode wird der maximal mögliche Oberflächen-Abfluss dann in Abhängigkeit der variablen Niederschlagsdauer ermittelt. Die wesentlichen Resultate sind graphisch ausgewertet, womit eine direkte Anwendung auf Probleme der Praxis sichergestellt ist. Die Berechnungsmethode wird schrittweise durch Beispiele erklärt.

Adresse des Verfassers: Dr. sc. tech., dipl. Bauing. ETH, *W. H. Hager*, Laboratoire de Constructions Hydrauliques, EPFL - DGC, 1015 Lausanne.

# Feststofftransport durch Grundwasserströmung

## Bautechnische Auswirkungen

**Bautechnische Eingriffe bewirken oft Strömungsveränderungen im Grundwasser, was unter Umständen zu einem unerwünschten Feststofftransport führen kann (Erosion, Suffosion, Kolmatation, hydraulischer Grundbruch). Das kann Setzungen oder Verstopfungen von Böden oder sogar den Zusammenbruch von Bauwerken zur Folge haben. Bei grösseren Bauwerken, wie beispielsweise bei Staudämmen, ist die Vermeidung solcher Auswirkungen erstes Gebot. Aber auch bei Tiefbauarbeiten kleineren Massstabs können, wie nachfolgende Beispiele zeigen, bedeutende Schäden eintreten. Empfehlungen zur Vorabklärung und für Massnahmen bei Tiefbauprojekten sollen helfen, solche Schäden zu vermeiden.**

Der Ingenieur ist oft gezwungen, Strassen, Kanalisationen, Wohn- und Gewerbebauten in Gelände zu planen, das wegen seiner heiklen Untergrundverhältnisse bisher gemieden wurde.

SIA-KOMMISSION FÜR WASSERWIRTSCHAFT UND WASSERTECHNIK

Eine der Schwierigkeiten ist der Wassergehalt des Bodens. In solchem Gelände können bereits unbedeutende Eingriffe oder Belastungsveränderungen Grundwasserflüsse erzeugen oder ändern. Die neue Wasserströmung vermag feste Teile des Untergrundes zu transportieren, d.h. sie von einem Orte wegzuschwemmen und anderswo anzulagern. Das kann die geotechnischen Eigenschaften des Bodens radikal ändern, das heisst, feste Böden verlieren ihre Tragfähigkeit und durchlässige Böden verstopfen.

Feststofftransport durch Wasserströmungen im Untergrund kann auch bei kleineren Bauten grosse Schäden auslösen. Deshalb hat die SIA-Kommission für die Wasserwissenschaft und Wassertechnik eine Schrift verfasst, die es dem Ingenieur ermöglichen soll, diese Phänomene kennenzulernen.

Es muss aber darauf hingewiesen werden, dass nur aufgrund der Klassifikation der Böden keine Voraussage über die möglicherweise auftretenden Probleme gemacht werden kann. Bereits in der Projektierungsphase eines Bauobjektes gehört es zur Sorgfaltspflicht des Ingenieurs, Architekten usw., ausser den geotechnischen Bodeneigenschaften auch die Grundwasserverhältnisse mittels Sondierungen und entsprechenden Versuchen abzuklären.

Der Ingenieur ist verpflichtet, den Bauherrn von der Notwendigkeit dieser Voruntersuchungen zu überzeugen und darauf hinzuweisen, dass Sparen in dieser Phase falsch ist und dass im Falle eines Schadens weit höhere Kosten entstehen können.

Im folgenden soll ein Einblick in die Problematik gegeben werden, damit man sich der Schwierigkeiten bewusst wird. Er beschränkt sich auf die bei der Strömung von neutralem Grundwasser möglichen Erscheinungen und klammert chemische und bakteriologische Wirkungen aus, welche die Schäden noch verschlimmern können.

## Beispiele

### Kanalisationsrohre in feinsandigen Böden

*Phase I:* Die Verlegung der Leitung erfolgt fachgerecht auf einer Magerbetonsohle. Die Arbeitsfugen der Betonsohle sind stark durchlässig.

*Phase II:* Nach einigen Jahren werden die Rohrverbindungen undicht, und das austretende Abwasser (Schmutzwasser, Fremdwasser, Grundwasser) bewirkt eine Ausspülung des sandigen Untergrundes unter der Magerbetonschicht.

*Phase III:* Bei starken Niederschlägen ist das Kanalisationsrohr fast gefüllt und auch die austretende Abwassermenge erhöht. Der Abfluss ausserhalb des Rohres beginnt sich bemerkbar zu

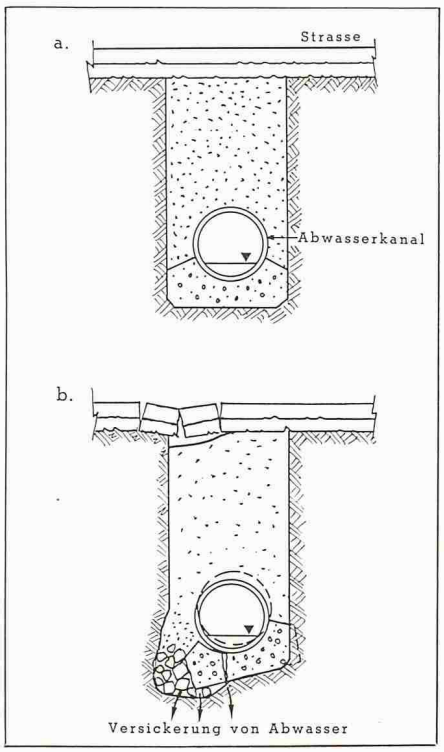


*Bild 1. Ausspülung des Untergrundes bei Kanalisationsrohr in feinsandigem Boden*

machen, und die erodierende Sohle des Rohrgrabens gibt nach.

*Folgen:* In vertikaler Richtung entstehen Rohrleitungsbrüche und dann Senkungen im Strassenkörper. Das Grundwasser wird durch das austretende Abwasser stark belastet (Bild 1).

## Feststofftransport in einem Wildbach-Schwemmkegel

Im Seedorfer Ried (Kt. Uri) verzahnen sich die Sedimente der Reuss, welche dieses Delta vorschüttet, mit den schubweise zustandegekommenen Ablagerungen des seitlich ins Tal einstossenden Palanggenbaches (Bild 2). In den Drainagen und insbesondere in den offenen Wasserläufen und Vorflutgräben kann man in gewissen Abschnitten an der Sohle Quellaufstösse beobachten. Einige davon werfen laufend Sand aus. Die Stärke der Quellaufstösse folgt mit einer Verzögerung von Stunden bis Tagen dem Gang der Schneeschmelze bzw. der Dauerregen.

*Phase I:* Drainagen und Vorflutgräben werden im Ried erstellt.

*Phase II:* Flächen- und Hangwasser sowie Bachwasser infiltrieren laufend und transportieren Feinmaterial aus den Sedimenten.

*Phase III:* Niederschläge und Schneeschmelze verstärken Infiltration und Transport von Feinmaterial.

*Phase IV:* Der Sandaustritt bringt die Gerinne zum Auflanden, das bedingt eine Verschlechterung der Vorflut, dadurch kommt es zur Wiedervernässung grosser Flächen.

## Dichtes Becken in Boden mit schwankendem Grundwasserspiegel

*Phase I:* In der Bauphase wird der Feinsand während der Grundwasserabsenkung teilweise ausgespült.

*Phase II:* Durch Bodenöffnungen wird während der Bauphase der Auftrieb des Beckens ausgeglichen, dabei wird weiter Feinsand ins Becken eingespült.

*Phase III:* Für die Inbetriebnahme des Beckens werden die Bodenöffnungen geschlossen. Der Wasserspiegel im Bekken liegt höher als der Grundwasserspiegel. Infolge gleichzeitigen niedrigen Wasserstandes im See wird die Tragfähigkeit der seeseitigen Matrix schlechter.

*Phase IV:* Durch die Leerung des Bekkens wird der Auftrieb wirksam. Die Folge ist eine Hebung des Beckens um 2–3 cm. Die nachfolgende Wiederfüllung des Beckens bewirkt eine einseitige Senkung, so dass die ursprüngliche Lage des Bauwerkes nicht mehr erreicht wird.

## Flussstau

Im Rückstaubereich eines Reusskraftwerkes besteht für eine Niederungsfläche von etwa 6 ha folgende Situation: Der mittlere Stauspiegel liegt etwa 3 m über Gelände, und der Untergrund besteht aus 4–8 m mächtigen, durchlässigen Feinsanden. Vor 17 Jahren wurde dort problemlos ein Wohnhaus gegründet (Bild 3).

*Phase I:* Der Rückstaudamm ist teilweise durchlässig, und am luftseitigen Böschungsfuss tritt Sickerwasser aus. Von den begleitenden Hängen bewegt sich Grund- und Oberflächenwasser in Richtung der Niederung und eines aus Gründen des Naturschutzes hochgespannten Teiches.

*Phase II:* Nach Verlust der freien Vorflut wird nun der gesamte Zufluss über ein Entwässerungspumpwerk entfernt, dessen Einlaufschwelle ungenügend tief liegt.

*Phase III:* Das Wohnhaus wird durch allgemein höhere Grundwasserspiegel und unterirdische Erosion beeinflusst (Setzung von Schächten, Feuchtigkeit usw.).

*Phase IV:* In den Ackerflächen zwischen Stein und Haus tritt sogenanntes Qualmwasser aus. An einigen Stellen fällt der Boden in kreisförmigen Löchern mit einem Durchmesser von 20–35 cm ein. In 20–40 cm Tiefe steht das Grundwasser an.

## Unterirdische Erosion

In einer kleinen Talung ohne Vorflut liegen ein Gebäude und eine Strasse. Geologisch gesehen handelt es sich um eine Molasserinne, welche durch Silt und Feinsand (Erosionsprodukt der Molasse) weitgehend aufgefüllt ist.

*Phase I:* Etwa 400 m oberhalb von Strasse und Gebäude verlaufen alte Quelleitungen, von denen praktisch das ganze Wasser im Untergrund versikkert.

*Phase II:* Die Quelleitungen wurden vermutlich erst im Lauf der Zeit undicht.

*Phase III:* Feinkörniges Material wurde während längerer Zeit durch ausströmendes Wasser ausgeschwemmt.

*Phase IV:* Über Nacht öffneten sich im Bereich der Quartierstrasse bzw. des Einfamilienhauses zwei Einsturztrichter von etwa 2–3 m Durchmesser und etwa gleicher Tiefe.

## Feststofftransport im Untergrund

Das Phänomen kann umschrieben werden als Verfrachtung von Feststoffteilen durch Wasserströmung in porösen Medien. Als solche gelten vor allem Lockergesteinsablagerungen, Schüttungen und Filter. Diese bilden durch ihre Gesteinskörner Systeme von zusammenhängenden Hohlräumen (feste Matrix), in welchen Wasser zirkulieren kann.

Im folgenden sollen hauptsächlich nichtbindige Böden betrachtet werden. Für die Verhältnisse bei bindigen Böden, wobei besonders die dispersiven Tone zu beachten sind, sei auf die Literatur verwiesen [6].

Beim Feststofftransport durch Grundwasserströmung sind zwei Hauptaspekte zu unterscheiden.

Da ist einerseits der eigentliche Transport. Voraussetzung dafür ist die Existenz einer genügend grossen Strömung in den Hohlräumen. Die Teilchen, welche transportiert werden, müssen nicht notwendigerweise aus dem betrachteten Boden selbst stammen oder in diesem abgelagert werden.

Dies führt zum zweiten Hauptaspekt, der Veränderung der Bodenstruktur. Die feste Matrix ist oft nicht so fest, dass sie sich nicht verändern könnte. Aus dem Verband der Körner einer Ablagerung können Teilchen ausgeschwemmt oder ganze Bodenteile in ihrer Struktur aufgebrochen und zerstört werden.

Voraussetzung zu Veränderungen ist meist wiederum eine genügend starke Strömung. Es ist aber durchaus denk-

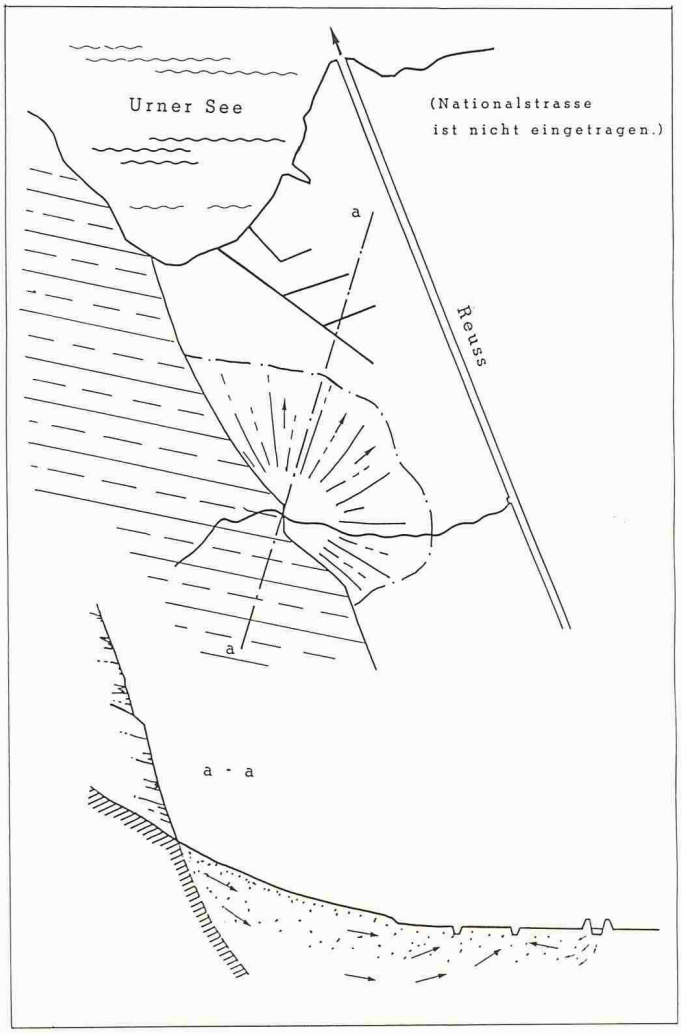


Bild 2. Feststofftransport in einem Wildbach-Schwemmkegel

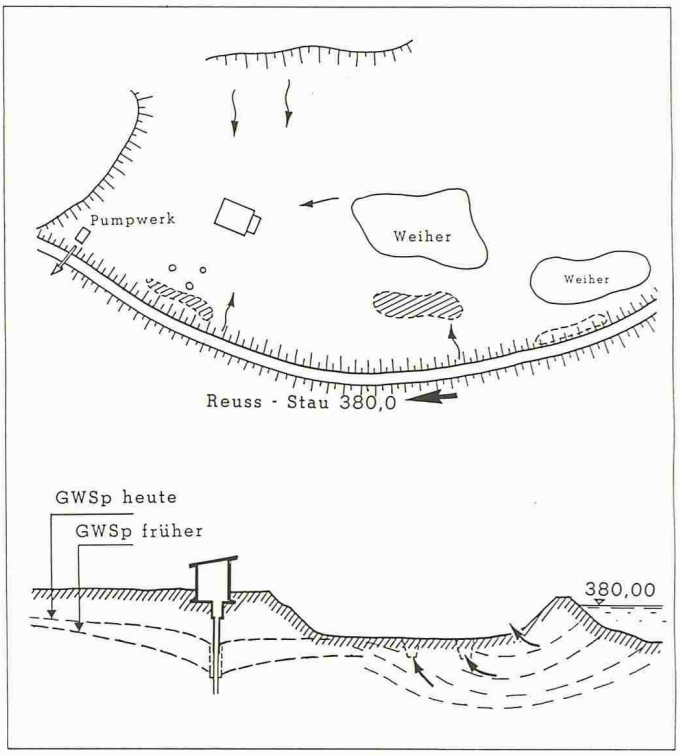


Bild 3. Wohnhaus im Rückstaubereich eines Reusskraftwerkes

bar, dass Teilchen auch ohne Strömung aus dem Kornverband austreten, z.B. als Folge von Erschütterungen. Das kann auch für trockene Ablagerungen gelten. Teilchen können aber auch abgelagert und in die feste Matrix eingefügt werden. In allen Fällen sind die Veränderungen für den Ingenieur von zentralem Interesse.

Bei den vorliegenden Betrachtungen sollen chemische Lösungs- und Ausfällungsprozesse sowie biologische Vorgänge ausgeklammert werden.

## Begriffe

Im folgenden werden die wichtigsten Begriffe zusammengestellt, wie sie von *Busch* und *Luckner*[1] definiert werden.

*Erosion*

Unter Erosion sind die Umlagerung und der Transport fast aller Fraktionen eines Erdstoffs zu verstehen. Bei Erosion durch die Strömung des Wassers ist zwischen äusserer und innerer Erosion sowie Fugen- und Kontakterosion zu unterscheiden.

Die äussere Erosion tritt bei Überschreitung der zulässigen Schleppspannung des fliessenden Oberflächengewässers auf. Die Grösse der erodierten Teilchen ist von der Schleppkraft abhängig.

Die innere Erosion findet im Inneren eines Erdkörpers statt, meist in grösseren, röhrenförmigen Hohlräumen, die oft vor Beginn der inneren Erosion durch pflanzliche oder tierische Einwirkungen oder durch Auswaschung und Erweiterung eines bevorzugten Porenkanals entstanden sind.

Die Fugenerosion kann zwischen massiven Bauteilen und dem angrenzenden Erdkörper entstehen. Die Gesetzmässigkeiten sind weitgehend identisch mit jenen der inneren Erosion.

Unter Kontakterosion wird die an einer Kontaktfläche zwischen einem feinen und einem gröberen Erdstoff entstehende Erosion verstanden. Die in den groben Erdstoff eindringenden Teilchen werden dort im allgemeinen abtransportiert (Suffosion), seltener abgelagert (Kolmatation).

*Suffosion*

Bei der Suffosion werden Teilchen der Skelettfüllung der feineren Fraktionen eines ungleichförmigen nichtbindigen Erdstoffes durch die Strömung umgelagert. Das tragende Erdstoffskelett wird dabei nicht verändert.

Durch Suffosion erhöhen sich die Porosität und der Durchlässigkeitsbeiwert, während die Dichte des Erdstoffes abnimmt. Suffosionsgefährdet sind Erdstoffe mit relativ grossem Ungleichförmigkeitsgrad und insbesondere solche mit einer Ausfallkörnung. Die innere Suffosion dauert nur kurze Zeit an.

Die Transportwege der bewegten Teilchen sind begrenzt, wenn die innere Suffosion nicht durch äussere Suffosion oder Kontaktsuffosion eingeleitet oder aufrechterhalten wird.

Die äussere Suffosion findet unabhängig von der Richtung der unterirdischen Wasserbewegung an der freien Oberfläche statt. Sie verursacht oder beschleunigt die innere Suffosion.

Bei der Kontaktsuffosion wandern die bewegten Teilchen des feinen Erdstoffes in die Poren des gröberen, wo sich der Vorgang im allgemeinen als innere Suffosion, seltener als Kolmatation fortsetzt.

*Kolmatation*

Bei der mechanischen Kolmatation werden im Porenraum des Skeletts fei-

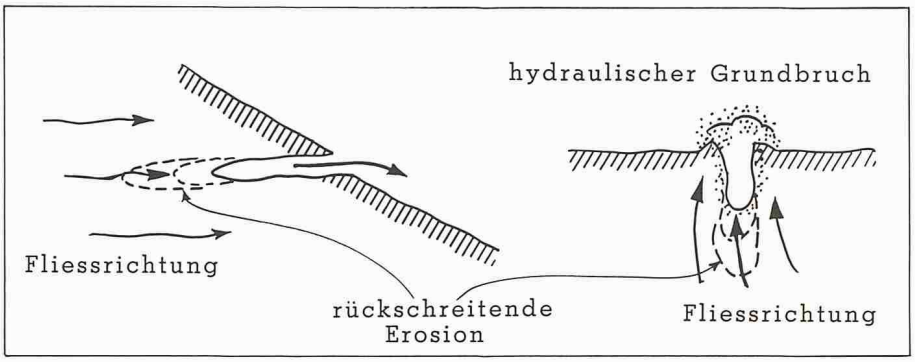


*Bild 4. Formen der rückschreitenden Erosion*

ne, von der Grundwasserströmung transportierte Teilchen abgelagert. Sie ist das Gegenteil der Suffosion. Wie bei dieser ist zwischen innerer und äusserer Kolmatation sowie Kontaktkolmatation zu unterscheiden.

Während Kolmatationsvorgänge somit stets im Zusammenhang mit der Strömung in den Porenkanälen zu betrachten sind, erfolgt bei der Sedimentation die Ablagerung feiner Teilchen aus einem Oberflächengewässer an dessen Sohle, ohne dass eine Infiltration in den Untergrund stattfindet. Umgekehrt zur Suffosion verringern sich bei der Kolmatation Porosität und Durchlässigkeitsbeiwert, während die Lagerungsdichte des Erdstoffs zunimmt.

*Hydraulischer Grundbruch*

Unter einem hydraulischen Grundbruch wird der Aufbruch eines Erdkörpers (alle Kornfraktionen) bei vorwiegend aufsteigender Grundwasserströmung verstanden, wenn die Grundwasserströmungskraft grösser wird als das Eigengewicht des unter Auftrieb stehenden Erdkörpers zuzüglich Reibungs- und Kohäsionskräften.

Der vom übrigen Erdkörper abgetrennte Teil vergrössert dabei seinen Porenraum und den Durchlässigkeitsbeiwert. Die Spannungen im Korngerüst werden nahezu aufgehoben.

Unter einem örtlichen hydraulischen Grundbruch versteht man eine eng begrenzte Erdstoffverformung, eine erhebliche Erdstoffverformung hingegen wird als allgemeiner hydraulischer Grundbruch bezeichnet. Der örtliche hydraulische Grundbruch leitet oftmals eine rückschreitende innere Erosion ein.

Erfolgt der Grundbruch an den Kontaktflächen eines groben mit einem feinen Erdstoff dort, wo der feinere nicht durch das Skelett des gröberen belastet wird, so spricht man vom hydraulischen Kontaktbruch. Dieser führt zu Kontakterosion und leitet häufig die rückschreitende innere Erosion ein.

Andere Autoren verwenden z.T. abweichende Definitionen. So werden z.B. gelegentlich die innere Erosion und Suffosion zusammen als innere Erosion bezeichnet. Zum Begriff der Suffosion wird häufig vermerkt, dass sie zu innerer Erosion führen könne [7]. Fugenerosion wird manchmal auch als konzentrierte Durchspülung bezeichnet [4].

## Voraussetzungen für Feststoffverfrachtung

Voraussetzung für Erosion und Feststofftransport ist das Überschreiten einer kritischen Fliessgeschwindigkeit.

*Äussere Erosion*

Böden im Kontakt mit einem Oberflächengewässer können Erosionsprozessen ausgesetzt sein. Fliessendes Wasser übt auf die Bodenteilchen im Grenzbereich zwischen Bodenkörper und Oberflächengewässer Kräfte aus, welche diese bewegen und verlagern können. Die Gesetzmässigkeiten dieser Prozesse sind Gegenstand des Sedimenttransportes in Oberflächengewässern und werden hier nicht weiter behandelt.

*Innere Erosion*

Ausgangspunkt für innere Erosion sind Hohlräume im Innern von Böden (Makroporen). Deren Abmessungen sind grösser als jene des angrenzenden Bodens. Sie sind häufig bevorzugte Wege für das Wasser, das hier unter Umständen schneller fliesst als im angrenzenden, wesentlich weniger porösen Medium.

Die Erosionsprozesse, welche sich im Kontaktbereich zwischen Hohlraum (Porenkanal) und angrenzendem Boden abspielen können, sind jenen der äusseren Erosion ähnlich. Eine quantitative Beurteilung der inneren Erosion ist meist nicht möglich, da man die lokalen Geschwindigkeiten sowie die geometrischen Abmessungen des Hohlraumes in der Regel nicht kennt. Zusätzlich von Bedeutung sind die Lagerungsdichte des Bodens und der Gehalt an bindigem Material.

Durch die innere Erosion werden die Hohlräume im allgemeinen rückschreitend gegen die Fliessrichtung vergrössert (rückschreitende Erosion). Die rückschreitende Erosion geht häufig von Punkten an der Oberfläche des Bodens, beim Übergang zu einem Oberflächengewässer (Grundwasseraustritte), aber auch von der Kontaktfläche zwischen einem feinen und einem groben Boden (siehe Kontakterosion) aus. Sie kann auch durch hydraulischen Grundbruch eingeleitet werden (Bild 4).

*Fugenerosion*

Durch die Auflockerung des Bodens können sich zwischen Bauwerken und angrenzendem Boden (Spundwände, Wehre, Rohre, Fundamente, Mauern) ebenfalls Hohlräume bilden. Diese können wie bei der inneren Erosion Ausgangspunkt für Erosionsprozesse sein.

*Kontakterosion*

Die Kontakterosion beginnt an der Kontaktfläche zwischen einem feinen und einem groben Boden. Das Problem stellt sich bei Mehrschichtfiltern, bei Filtern im Kontakt mit einem Boden (z.B. Brunnenfilter), aber auch bei Lokkergesteinsablagerungen, welche Inhomogenitäten aufweisen (Schichtungen, Linsen).

Der Erosionsprozess beginnt dann, wenn Körner (aller Kornfraktionen) des feineren Bodens in die Poren des gröberen gelangen und wegtransportiert werden. Massgebend für die Beurteilung der Kontakterosion sind demnach die Kornverteilung der Feinschicht und die Porenverteilung der Grobschicht, wobei in letzterer hauptsächlich die grössten durchgängigen Poren wichtig sind.

Die Porenverteilung eines Bodens ist nur schwer zu bestimmen, sie ist u.a. auch von der Lagerungsdichte des Bodens abhängig. Zur Beurteilung behilft man sich deshalb meist mit der Kornverteilungskurve. Die Porenverteilung ist auch von der Lagerungsdichte des Bodens abhängig.

Der Kontakterosion kann eine rückschreitende innere Erosion folgen. Sie ist daher besonders gefährlich.

Auf ein Korn wirken die Schwerkraft, der Auftrieb, die Strömungskraft sowie Auflagerkräfte bezüglich benachbarter Körner.

Bei bindigen Böden kommen noch Bindungskräfte dazu, wobei auf die Problematik bindiger Böden mit disperser Struktur hinzuweisen ist. Besonders an Kontaktflächen können die Auflagerkräfte klein sein, weil das gefährdete Korn nicht mehr so gut eingebettet ist wie im Innern des feineren Materials.

Für die Kontakterosion sind die Lage der Kontaktfläche sowie die Richtung

und die Grösse der Strömungskraft bedeutsam. Da die Strömungskraft vom lokalen hydraulischen Gefälle abhängt, spielen die hydraulischen Parameter für den Feststofftransport eine grosse Rolle. Zusätzlich ist die Richtung der Strömungskraft wichtig, da sich die auf das Korn wirkende resultierende Kraft aus der Strömungskraft und der Schwerkraft zusammensetzt.

Die Schwerkraft kann verstärkend oder vermindernd wirken. Neben rein geometrischen Kriterien (Poren- und Kornverteilung) sind also auch hydraulische Parameter an der Erosion und am Feststofftransport beteiligt. Eine kritische geometrische Konfiguration genügt also noch nicht für den Beginn einer Erosion. Es muss auch das minimale kritische hydraulische Gefälle vorhanden sein.

*Suffosion*

Bei der Suffosion wird das gefährdete Korn aus dem inneren Körnerverband des Bodens gelöst und verlagert. Dazu muss als geometrische Bedingung wiederum ein minimaler kritischer Porendurchmesser vorhanden sein. Diese geometrische Bedingung wird hauptsächlich von der Kornverteilung geprägt. Die Idealkurve für gute Kornabstufung ist die Fullerkurve (gültig für kugelige Körner). Die Porenräume zwischen den grossen Körnern werden dabei jeweils mit kleineren Körnern gefüllt. Es resultieren somit sehr kleine Porendurchmesser, wenn die Packung genügend dicht ist und die Körner homogen verteilt sind. Ein solcher Boden gilt als suffosionssicher.

Bei Abweichung von der Fullerkurve nimmt die Suffosionsgefährdung generell zu. Besonders kritisch sind Kornverteilungen mit ausgeprägter Ausfallkörnung. Der Vorgang der Suffosion ist meist langsam.

*Kolmatation*

Ein transportiertes Korn wird abgelagert, wenn die Porengeometrie dies erzwingt oder wenn das minimale hydraulische Gefälle für einen Transport unterschritten wird.

Das hydraulische Gefälle ist wiederum von der Grösse und der Richtung der Strömungskraft abhängig. Der Vorgang der Kolmatation ist meistens langsam.

*Hydraulischer Grundbruch*

Voraussetzung für hydraulischen Grundbruch ist eine vertikal nach oben wirkende Komponente der Strömungskraft, welche grösser ist als die Schwerkraft des unter Auftrieb stehenden Bodens. Der hydraulische Grundbruch kann sehr schnell erfolgen (Bild 5).

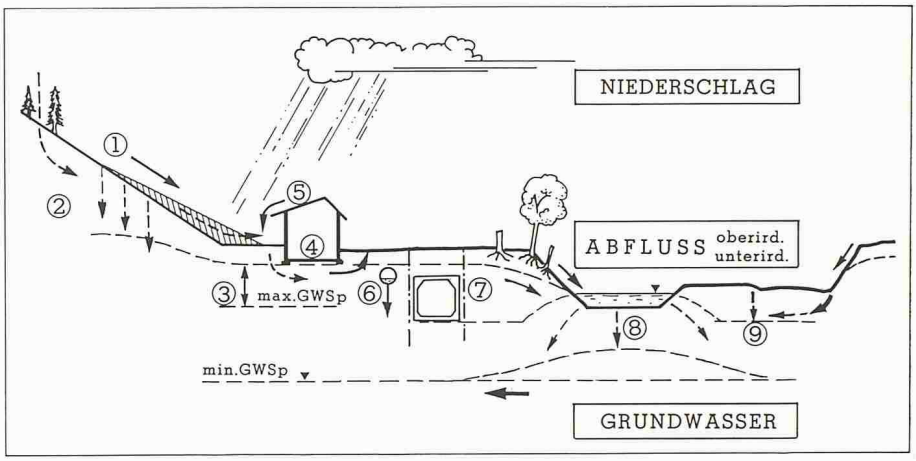


*Bild 5. Schematische Darstellung einiger Ursachen für Feststofftransport im Grundwasser. 1 – Oberflächenerosion und Bildung von Sediment- und Schuttkegeln, 2 – Einschwemmen von organischen und mineralischen Partikeln, 3 – Künstliche und natürliche Grundwasserspiegelschwankungen, 4 – Ausschwemmung der Bestandteile einer tragfähigen Matrix, 5 – Punktuelle Einleitung von Oberflächenwasser in Untergrund, 6 – Exfiltration aus Abwasserkanälen, 7 – Grundwasserstau mit Hilfe von langen Bauwerken, 8 – Infiltration entlang der Fliessgewässer, 9 – Entwässerung der Strassenflächen ohne Rohrleitungen.*

## Massnahmen und Empfehlungen

Menschliche (z.B. bautechnische) Eingriffe in einem wasserführenden Untergrund haben stets Veränderungen des natürlichen Wasserhaushaltes (d.h. des vorhandenen) Abflussgleichgewichts zur Folge. Dies kann wesentliche Sicherheitsrisiken bedeuten, da diese Veränderungen zu einem unerwünschten Feinstofftransport und damit z.B. zu Setzungen führen können, welche in Grundwasser oder Hangsickerwasserbereiche eindringen. Deshalb sind entsprechende Vorabklärungen nötig.

Dazu ist folgendes Vorgehen zu empfehlen:

- generelle hydrogeologische Beurteilung des Bauareals in einem grösseren Zusammenhang;
- Baugrunduntersuchungen, welche Angaben liefern über die Wasserverhältnisse im Untergrund;
- Gegenüberstellung des Bauvorhabens mit den Untersuchungsergebnissen sowie
- entsprechende technische Schlussfolgerungen, die sich daraus ergeben.

Es sind zwei Hauptaspekte zu berücksichtigen:

- Stabilität bzw. Sicherheitsreserve der Grundwasser- oder Sickerwasserströmung im Untergrund in bezug auf Feststofftransport, insbesondere die Verhältnisse $J_{vorh.}$ zu $J_{krit.}$ sowie $k_{vorh.}$ zu $k_{krit.}$ ($J$ = Gradient der Sickerströmung und $k$ = Durchlässigkeitsbeiwert)
- Auswirkungen des Bauvorhabens auf den ursprünglichen Zustand $(J/k)$

## Hydrogeologische Beurteilung

Es ist dem Geologen vor der Durchführung jeglicher Baugrundsondierungen in den meisten Fällen möglich, auf Grund der generellen hydrogeologischen Zusammenhänge eine Prognose über die zu erwartenden Grund- oder Sickerwasserverhältnisse aufzustellen. Da diese immer in Zusammenhang mit der Entstehungsgeschichte des Untergrundes stehen, führt die Übersicht über die lokalen geologischen Vorgänge – meist der jüngsten Erdgeschichte, d.h. der Quartärzeit – sehr oft zu wesentlichen Aussagen. Wie wichtig dieser erste Untersuchungsschritt ist, zeigt das folgende Beispiel.

Am unmittelbaren Rand einer schmalen Rippe längs einem tiefen Flusstobel soll in deutlich erhöhter Lage über der benachbarten Dorfebene eine grössere Überbauung erstellt werden. Der Untergrund des Areals ist als felsig bekannt. Die beteiligten Baufachleute erwarten eine dünne Moränenüberdekkung über Sandsteinfels sowie trockene Verhältnisse.

Am Ende der letzten Eiszeit war die genannte Rippe bei relativ hohem Eisniveau in einen ausgedehnten Eisrandsee eingetaucht. Die reichlichen Schmelzwässer flossen längs des Eisrandes zu dieser Rippe, wo sich ein grosses Feinsanddelta ablagern konnte. Dessen grösster Teil ist seit dem weiteren Zurückweichen des Eises von diesen Abhängen wegerodiert worden. Lediglich in grösseren Felsmulden blieben die Sedimente liegen. In diesen verblieben ausserdem die reichlichen Sickerwasserströme.

Beim Aushub für das genannte Bauvorhaben traf man mitten in diese völlig

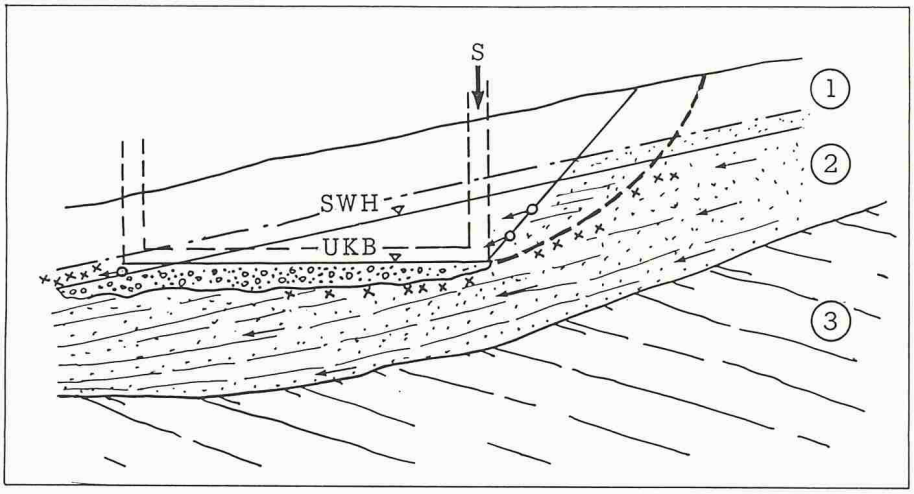


*Bild 6. Gegenüberstellung eines Bauvohrhabens mit gegebener Sickerwassersituation. SWH = Sickerwasserhorizont, UKB = Unterkante Bauwerk, 1 = Verwitterte Deckschicht, 2 = Randeiszeitliches Schwemmsediment, 3 = Molasse-Sandstein, ××× = Feinstofftransport*

unerwarteten Feinsandsedimente mit den genannten reichlichen Sickerwässern. Die Folge waren unerwartete Baugrubenprobleme und Wasserkalamitäten mit entsprechenden Kosten.

Eine generelle Überprüfung der hydrogeologischen Verhältnisse hätte die Bauleute gewarnt, und das Schlimmste hätte vermieden werden können.

Dieses Beispiel ist eine der vielen Situationen, die im Bereich der schweizerischen Quartärlandschaft und ihrer sehr komplizierten eiszeitlichen Entstehungsgeschichte auftreten.

## Baugrunduntersuchungen

Zur Erfassung von Lage, Strömungsneigung und Sickergeschwindigkeit allfälliger Grund- oder Sickerwässer sind in der Regel spezielle Felduntersuchungen unerlässlich.

*Sondierschlitze*

Sondierschlitze sind sehr zweckmässig, da sich allfällige Sickerwasserzutritte an Ort beobachten lassen, wenn sie während genügend langer Zeit offen bleiben. Bei sehr feinkörnigen Böden ist jedoch zu beachten, dass es oft mehrere Stunden dauert, bis sich im Sondierschlitz genügend Wasser angesammelt hat. Das kann zu Fehlinterpretationen führen.

*Wasserbeobachtungsrohre*

Es empfiehlt sich in allen Fällen, Beobachtungsrohre (Piezometer) in die Sondierlöcher zu versetzen, damit der Grund- bzw. Sickerwasserspiegel während längerer Zeit beobachtet werden kann.

*Sondierbohrungen*

Bei tieferen Projekten sind Sondierbohrungen unerlässlich, weil die mögliche Aushubtiefe bei Sondierlöchern begrenzt ist.

Da das Bohrverfahren den Untergrund stört, ist auch hier das Versetzen von in Filtermaterial eingebetteten Piezometern unbedingt zu empfehlen.

Genügend Beobachtungszeit ist nötig, damit sich der ungestörte wirkliche Grundwasserspiegel feststellen lässt.

*Feld- und Labormessungen*

Äusserst wichtig ist das Messen der Durchlässigkeit des Untergrundes. Das kann durch Entnehmen von Proben (evtl. mit Siebanalysen) und entsprechender Abschätzung der Durchlässigkeit erfolgen. Genauere Daten liefern Pumpversuche aus Sondierbohrungen oder in besonderen Fällen Durchlässigkeitsmessungen im Labor an ungestörten Proben, meist Ödometerversuche.

In besonders schwierigen Fällen sind mehrere Piezometer in Bohrungen einzubauen, um die Oberfläche der Sicker- bzw. Grundwasserströmung im einzelnen zu beobachten.

## Untersuchung der Grundwasser- bzw. Sickerwassersituation

Die Wasserverhältnisse im Untergrund, speziell bei Hangsickerwasser, sind meist komplex. Es empfiehlt sich daher, Dokumente zu erstellen, die darüber möglichst anschauliche Aussagen machen.

Bewährt haben sich hydrogeologisch-geotechnische Querprofile. Durch solche zeichnerischen Darstellungen der Untersuchungsergebnisse von Feld und Labor und durch das Eintragen des vorgesehenen Projektes lassen sich Natur und menschlicher Eingriff vergleichen.

Beim vorhergenannten Bauvorhaben auf der Geländerippe ergab sich nach dem Aushub der Baugrube die in Bild 6 dargestellte Situation.

Das Bauwerk gelangte auf der Bergseite etwa 1,5 m in den Sickerwasserbereich des Hanges. Unter feinkörnigem Gehängeschutt (1) fand sich im Bereich des Sickerwasserhorizontes (SWH) eine hangparallel geschichtete Lagerung von wechselweise siltigem Feinstsand bis tonigem Silt (2).

Sofort nach Aushub traten aus den siltigen Feinstsandlagen geringste Mengen von Sickerwasser aus. Kurz nach dem Baugrubenaushub, der nach einer längeren Trockenperiode ausgeführt worden war, brachte ein Wetterumschlag äusserst ergiebige Niederschläge. Dadurch stieg der Porenwasserdruck in den genannten sickerwasserführenden Horizonten erheblich an. In der Folge stürzten weite Bereiche der Baugrube ein, anschliessend füllte sich diese mit Wasser.

Durch den Aushub ergab sich eine tiefere Vorflut für das Sickerwasser und damit eine erhöhte Oberflächenneigung. Die Folge der gutgemeinten Anordnung von Sickerkies auf der Baugrubensohle war eine um mehrere Zehnerpotenzen erhöhte Durchlässigkeit auf der Baugrubensohle. Damit wurden für den Feinstofftransport zwei nachteilige Einflüsse kumuliert: einerseits eine Erhöhung der Sickerneigung, anderseits eine gegen jegliches Filterkriterium verstossende erhöhte Durchlässigkeit unter der Fundamentplatte.

In der Folge wurde das Gebäude auf diesem Sickerkies erstellt. Es zeigte sich sehr bald, dass bei Niederschlägen aus dem Sickerkies beträchtliche Mengen Feinstsande (täglich mehrere hundert

**Literatur**

[1] *Busch K.-F.* und *Luckner L.*: «Geohydraulik», VEB, Leipzig, 1972

[2] *Cedergren H.*: «Seepage, drainage and flow nets», John Wiley, New York, 1967

[3] *Davidenkoff R.*: «Unterläufigkeit von Stauwerken», Werner, Düsseldorf, 1970

[4] *Davidenkoff R.*: «Anwendung von Filtern im Wasserbau», Wilhelm Ernst, Berlin, 1976

[5] *Lang H.-J.* und *Huder J.*: «Bodenmechanik und Grundbau», Springer, Berlin, 1984

[6] *Sherard J.L.* and *Decker R.S.* (Ed.): «Dispersive clays, related piping and erosion in geotechnical projects», Symp. 1976, Chicago, American Soc. for Testing and Materials, Philadelphia, 1977

[7] *Wittmann L.*: «Sicherheitsaspekte bei der Filterbemessung», Wasserwirtschaft 72 (3), 147–151, 1982

Liter) ausgespült wurden. An mehreren Stellen trat hydraulischer Grundbruch auf.

Dieser Verlust an Feinmaterial, dessen Herkunft unklar war, bildete ein bedeutendes Risiko für die Sicherheit des Bauwerkes. Es mussten Sofortmassnahmen getroffen werden. Die Bauleitung entschied sich für Nachinjektionen unter der Fundamentplatte, um den zu hohen k-Wert des Sickerkieses zu reduzieren. Dies war kostengünstiger als die vom zugezogenen Berater vorgeschlagene Entwässerung rund um die Fundamentplatte. Noch liegen zu wenig Erfahrungen vor, um den bleibenden Erfolg dieser Injektionen zu bestätigen.

Wenn die entsprechenden Sickerströmungsverhältnisse vor Baubeginn bekannt gewesen wären, hätten diese Probleme anhand des Vergleichs der Schnittpläne weitgehend vermieden werden können. Wäre die Fundamentsohle um weniges höher angeordnet worden, so hätten sich Kosten einsparen lassen. Anderseits hätten die entsprechenden Baugrubensicherungen und filtertechnischen Anordnungen rechtzeitig im voraus und ohne kostenerhöhende Bauverzögerung beschlossen werden können.

Mitgeteilt von der SIA-Kommission «Wasserwirtschaft und Wassertechnik» unter Mitarbeit von *F. Adam, J.F. Ammann, R. Blasche, R. Favre, K.H. Meyer, C. Mombelli, B. Novak, W. Rehse, F. Ryser, H.O. Schiegg, H.J. Schlegel, N. Sieber* und *F. Stauffer.*

# Wasserwerksbau

## Fortschritte in der baulichen Konstruktion

**Zum Anlass des Weltkongresses der International Water Supply Association (IWSA) im September 1988 in Rio de Janeiro wurde eine weltweite Untersuchung zu diesem Thema durchgeführt. Die in 88 Ländern erhobenen Abklärungen haben ergeben, dass sich die Bauingenieure zwar schnell an die neuen Bedürfnisse für Aufbereitung des Trinkwassers, der Grundwasserverhältnisse, Bodenbelastungen etc. angepasst haben, die Herstellung von wasserdichtem Beton jedoch immer schwieriger wird. Oft wird die verlangte glatte Oberfläche mit chemisch aufgewerteten Verputzen erreicht, welche die Undichtigkeit des Rohbetons überbrücken sollen.**
**Ökonomische und ökologische Gründe erfordern vermehrt Aufmerksamkeit für Probleme wie Reduzierung der Energiekosten, Betonkorrosion, Wasserbelastung, saurer Regen usw. Die nachfolgenden Ausführungen basieren auf über 25jährige schweizerische Erfahrung und enthalten einige Antworten auf die genannte Umfrage.**

### Fassung von Oberflächenwasser in Flüssen

Die Rhône dient an zahlreichen Stellen zur Gewinnung von Trink- und Brauchwasser. Die Bedingungen dazu

VON FREDY GEERING, ZÜRICH

sind gut. Auch im Oberlauf der Rhône steht eine grosse Menge Wasser zur Verfügung, die sich wegen der niedrigen Temperaturen als Trink- oder Kühlwasser gut eignet. Der Flussabschnitt oberhalb des Genfersees weist einige besondere Schwierigkeiten bei der Entnahme von Flusswasser auf. Da ist einmal die grosse Schwankung hinsichtlich der Wasserführung zu nennen, die sich zwischen 34 $m^3/s$ und 1050 $m^3/s$ bewegt, oder anders ausgedrückt eine Wasserspiegelhöhendifferenz von 4,65 m.

Ein weiteres Problem bilden die mitgeführten Fremdstoffe. Dabei handelt es sich um einen hohen Gehalt an feinstem Gletscherschliff, der vorwiegend aus zerriebenem Granit, d.h. Quarz und Glimmer, besteht und aus grossen Felsbrocken, Steinen, Baumstämmen, Gras, Humus, etc., die bei Hochwasser infolge der Schneeschmelze und Gewitter entstanden sind.

Die Rohwasserfassung musste auf die hohe Strömungsgeschwindigkeit, die instabile Flusssohle und die starke Wasserspiegelschwankung abgestimmt werden. Einige Meter vom Ufer entfernt wurden im Rhônebett ein erster und später ein zweiter Fassungsturm mit plankonvexem Querschnitt parallel zur Strömungsrichtung erstellt. Der Zufluss erfolgt an der konvexen Seite durch 5 Grobrechen. Durch diese Formgebung des Entnahmeturmes ist eine permanente Freispülung, d.h. Selbstreinigung der Rechen durch die Strömung, gewährleistet.

Durch die Saugleitungen im Fassungsturm, die bis unter das tiefste Niedrigwasserniveau herabgezogen worden sind, gelangt das Wasser über die Rohwasserpumpen zur Aufbereitung. Bei jeder Pumpenabschaltung kommt es durch den Rückfluss eines Teils des vorher entnommenen Wassers zur Freispülung des Gletscherschliffes, der sich aufgrund der reduzierten Fliessgeschwindigkeit in der Ruhewasserzone im Entnahmeturm abgesetzt hat.

Ohne zusätzliche Energiekosten ist somit ein störungsfreier Betrieb einer so gestalteten Oberflächenwasserfassung gesichert.

### Neuerungen beim Filterbau

Die Filtration stellt einen wesentlichen Teil der Wasseraufbereitung dar. Die Mehrschichtfiltration hat die Laufzeit und die Wirksamkeit der Schnellfilter beträchtlich erhöht.

1914 wurden die ersten Drainagefilter konstruiert, die jedoch für die Regeneration der Filtermasse zu aufwendig gebaut waren.

Durch die Einführung von Filterdüsen und der entsprechenden Düsenplatten konnten nun die Filtermedien einwandfrei mit Luft, Luft/Wasser und Wasser gespült und getrennt werden. Die Längsverteilrinnen für die Ver- und Entsorgung der Filter waren sehr kostspielig. Dank der Düsenplattenkonstruktion konnten nun Kopfbauten mit frontaler Ver- und Entsorgung der Filterfelder erstellt werden. Die anfänglich auf 50 $m^2$ beschränkten Filterflächen mussten aus ökonomischen Gründen wesentlich vergrössert werden. Heute sind Filterfelder von 150 $m^2$ Grösse die Norm. Die Filterdüsen und die entsprechenden Platten zeigten sich immer mehr als das schwächste Glied in der Gesamtkonstruktion der Filter.

Durch den Bau der neuen Drainagefilter 87 ist es möglich, durch eine ge-