Zeitschrift: Schweizer Ingenieur und Architekt
Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band: 117 (1999)
Heft: 36

Artikel: Hydraulische Aspekte
Autor: Kapar, Heinz / Aggeler, Michael
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-79782

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 30.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

trug in der Höhe ±1 mm, in der Lage ±5 mm. Die Basis der Lage bildeten Absteckungspunkte im Abstand von 10 m auf dem Sohlbeton in der Stollenachse. Davon ausgehend konnten die parallelen Rohrachsen mit einer Lehre markiert werden. Die Höhenlage der Rohre wurde mit einem Rotationslaser mit automatischer Horizontierung und der Möglichkeit der manuellen Bildung einer schiefen Ebene bestimmt. Als Empfänger dienten Präzisionsdetektoren. Der Laser fixierte in 50 cm Höhe eine parallel zur Rohrsohle verlaufende Ebene mit dem geforderten Gefälle.

Das permanente Nachmessen der Steinzeugrohre durch die Unternehmung mit der Präzisionswasserwaage und einem Nivellement sowie die Kontrolle einiger Rohrabschnitte mit Präzisionsnivellement durch das Vermessungsamt der Stadt Zürich gaben dem Bauherrn die Gewissheit, dass sich die Abwasserrohre nach dem Einbringen des Rohrbettungsbetons nicht verschoben hatten und die Verlegegenauigkeiten eingehalten waren.

Adressen der Verfasser:
Markus Ulrich, dipl. Ing. HTL, Entsorgung + Recycling Zürich, Bändlistr. 108, 8010 Zürich, *Gottlieb Künzli*, dipl. Ing. HTL, Zschokke Locher AG, Pelikan-Platz 5, 8022 Zürich, und *Rolf Schlatter*, dipl. Ing. HTL, SNZ Ingenieurbüro AG, Seiler Niederhauser Zuberbühler, Dörflistrasse 112, 8050 Zürich

Heinz Kaspar und Michael Aggeler, Zürich

Hydraulische Aspekte

Die Projektierung und Ausführung des grossen Bauvorhabens erfordert bei der hydraulischen Auslegung eine übergeordnete Koordination. Diese ist besonders bei den Schnittstellen, wo beispielsweise neben der Abwasserleitung auch die entsprechenden Lüftungsrohre geführt werden müssen, nötig. Die Koordination wurde einem «Gesamthydrauliker» übergeben, der den einzelnen Projektverfassern Vorgaben zu formulieren hatte und deren Einhaltung überwachen musste.

Nachdem im Jahre 1993 das Vorlageprojekt ausgearbeitet war, wurde klar, dass für die weitere Projektierung die Koordination der verschiedenen Projektierungsteams von zentraler Bedeutung sein würde. Es galt, das rund 5 km lange Überleitungssystem kontinuierlich und in allen Elementen sorgfältig aufeinander abgestimmt zu projektieren und auszuführen. Neben dem Festlegen der übergeordneten hydraulischen Randbedingungen war insbesondere an den Schnittstellen der drei Teams eine klare Aufgabenteilung vorzunehmen. Ein Team ist verantwortlich für die Rohre in der unteren Querschnittshälfte des Stollens, ein zweites für den obenliegenden Teil des Gesamtvorhabens SAN mit dem Umbau des Klärwerks Glatt und ein drittes für den untenliegenden Teil mit dem Düker unter der Limmat.

Gemäss den Forderungen der Bauherrschaft ist eine möglichst grosse Abwassermenge im Stollen abzuleiten. Je mehr die Kapazität die übliche, zweifache Trockenwetterabflussmenge überschreitet, desto mehr kann die Glatt während Regenwetter von Abwasser verschont bleiben. Auch sollte das für die Stadt Zürich sehr bedeutungsvolle «Jahrhundertwerk» der Abwasserentsorgung genügend Reserven für zukünftige, unvorhersehbare Entwicklungen aufweisen und deshalb nicht zu knapp bemessen sein.

Die übergeordnete Aufgabe des für die Gesamthydraulik beauftragten Ingenieurs bestand somit darin, für das einwandfreie Ableiten einer möglichst grossen Menge Abwassers zu sorgen. Dazu schien es sinnvoll, den einzelnen Teams klare Vorgaben zu stellen, beratend zur Seite zu stehen, die ausgearbeiteten Projekte zu prüfen und zu korrigieren, die Auswirkungen von Toleranzen bei der Ausführung zu beurteilen und nicht zuletzt die Vorgaben für den zukünftigen Betrieb aufgrund der Erfahrung bei der Inbetriebsetzung zu formulieren.

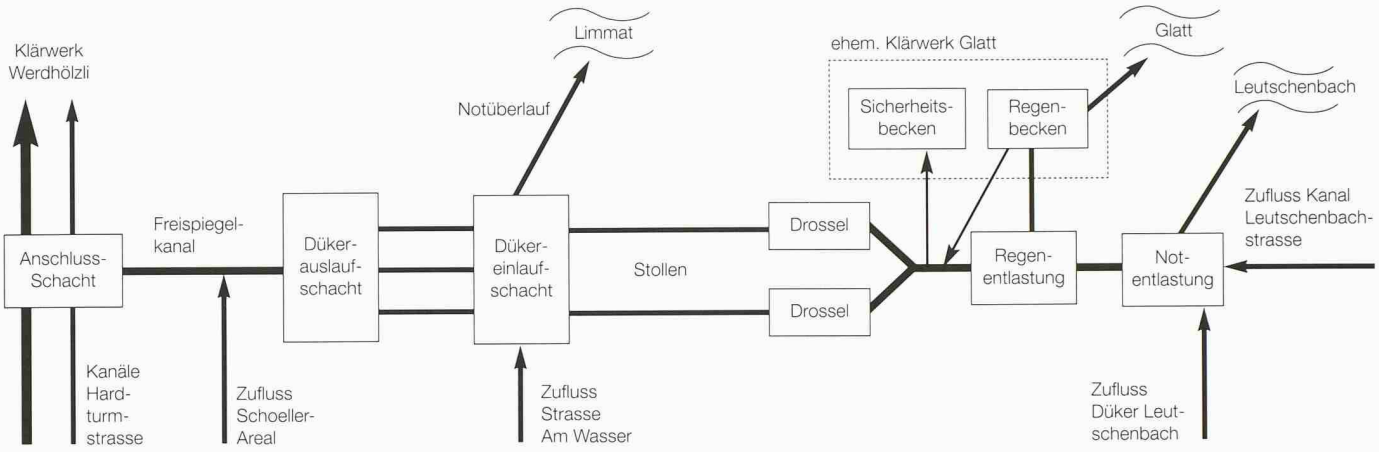
Dimensionierungsabflussmengen

Die neue Überleitung hat das Abwasser von Zürich-Nord anstelle des heutigen Klärwerks Glatt aufzunehmen. Die Zuflüsse erfolgen über den Kanal Leutschenbachstrasse und über den Düker Leutschenbach. Zur Dimensionierung kann somit von den Betriebsdaten des Klärwerks Glatt ausgegangen werden, ergänzt mit den Werten für die Regenwetterabflüsse aus den Berechnungen nach der Ganglinien-Volumen-Methode, welche die Entsorgung + Recycling Zürich (ERZ) anwendet. Am unteren Ende des Stollens erhöht sich die Abflussmenge durch den Zufluss der Kanalisation in der Strasse Am Wasser. Auf der anderen Seite des Dükers Limmat liegt der Zufluss des Kanals beim Schoeller-Areal, womit in der untersten Strecke der neuen Überleitung, im Freispiegelkanal, die Abflussmenge am grössten ist. Über einen Anschlussschacht fliesst das Abwasser in zwei parallel verlaufende Kanäle in der Hardturmstrasse, die genügend gross sind, um das zusätzliche Abwasser dem Klärwerk Werdhölzli zuzuleiten.

Die zukünftigen Anforderungen gab die ERZ anhand einer Abflussprognose für das Jahr 2070 vor, wobei für die Trockenwetterabflüsse der heutige Schmutzwasseranteil um die prognostizierten Einwohnergleichwerte (EWG) erhöht und die Fremdwasserzuflüsse den möglichen Sanierungen entsprechend reduziert wurden. Die in Bild 2 angegebenen Trockenwetterabflüsse entsprechen dem üblichen 16-Stunden-Mittel. Beim zweifachen Trockenwetterabfluss ist der Fremdwasseranteil nur einmal enthalten.

Die maximale Mischwasserabflussmenge bei Regenwetter im Kanal zum Klärwerk Glatt beträgt heute 16,5 m^3/s, ist begrenzt durch das Kanalnetz im Einzugsgebiet Zürich-Nord und gilt unverändert auch für die Prognose. Die Abflussmengen, die die Kapazität der Abwasserrohre im Stollen überschreiten, werden in den Regenbecken kurzfristig gespeichert; übertrifft die Regenwassermenge das Volumen der Regenbecken, fliesst das Wasser durch die Klärüberläufe der Regenbecken der Glatt zu. Für diesen Fall sind die Regenbecken so ausgelegt, dass das Überlaufwasser grob gereinigt wird.

Die in Bild 2 angegebenen Maximalabflüsse im Stollen von 2,8 m^3/s resultieren nicht wie die anderen Werte aus den Zuflüssen des Kanalisationsnetzes, sondern widerspiegeln die maximale Abflusskapazität der gewählten Rohre. Es zeigt sich, dass die im Hinblick auf den Gewässerschutz übliche zweifache Trockenwetterabflussmenge von 1,3 m^3/s spielend abge-



1
Schematische Darstellung der hydraulischen Elemente des Gesamtvorhabens SAN

leitet werden kann, allerdings müssen dazu beide Rohre in Betrieb gesetzt werden. Dies rührt daher, dass die maximale Abflussmenge in einem Rohr nur bei Hochwasser erreicht wird, wenn sich bei der Drosseleinrichtung ein entsprechend hoher Druck aufgebaut hat.

Aus diesen Ausführungen ist die Abgrenzung des Aufgabenbereichs des Hydraulikers zu erkennen. Dieser hat das einwandfreie Funktionieren aller abwasserführenden Teile zu gewährleisten und die entsprechenden Daten und Kennwerte sauber zu dokumentieren. Die abwassertechnische und gewässerschützerische Bewirtschaftung hingegen ist später vom Kanalnetzbetreiber wahrzunehmen, unter Einbezug der Kanalnetze auf beiden Seiten der Überleitung, des Betriebszustands des Klärwerks Werdhölzli und auch der Gewässergüte der Glatt und der Limmat.

Abwasserrohre im Stollen

Auf den ersten 2,4 km beträgt das Gefälle 2,212‰, auf den restlichen 2,9 km 2,0‰. Unregelmässigkeiten des Stollenrohbaus werden mit dem Verlegen der Abwasserrohre aus Steinzeugmaterial ausgeglichen. Die Steinzeugrohre mit dem Nenndurchmesser 1100 mm sind für den Abfluss mit freiem Wasserspiegel konzipiert und dürfen nicht unter Druck betrieben werden, da ein grösserer statischer Wasserdruck oder auch Druckstösse zu Schäden führen können. Die Vorgabe des Freispiegelabflusses ist die wichtigste hydraulische Rahmenbedingung des Gesamtvorhabens. Die einzelnen Konstruktionen auf beiden Seiten des Stollens und im Stollen selber sind so zu gestalten, dass ein Abfluss unter Druck physikalisch ausgeschlossen werden kann.

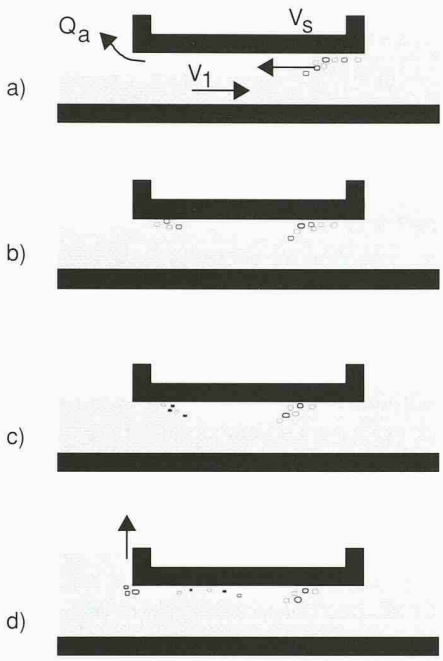
Aufgrund der Geometrie des Kreisprofils erreichen die Stollenrohre bei 83% Teilfüllung die gleiche Abflussmenge wie bei Vollfüllung. Bis zu welchem Teilfüllungsgrad kann nun ein Zuschlagen der Rohre, das heisst, der plötzliche Übergang von Teil- in Vollfüllung, ausgeschlossen werden? Massgebende Versuche zur Erforschung dieses Themas führte Sauerbrey im Jahre 1969 mit einem 61,5 m langen Asbestzementrohr der NW 300 durch. Die Ergebnisse dieser Arbeiten weisen darauf hin, dass die Stollenrohre bei 83% Teilfüllung noch nicht zuschlagen [2]. Zusätzlich positiv wirkt sich aus, dass die Wasserspiegellage durch den strömenden Abfluss infolge des kleinen Gefälles des Stollens sehr stabil ist [3]. Da mit der Wahl von Steinzeugrohren eine relativ grosse Toleranz von ± 25 mm des Innendurchmessers (Sollweite) von 1098 mm in Kauf genommen werden musste, wurde der zulässige Teilfüllungsgrad auf 81% der Sollweite herabgesetzt, um ein Zuschlagen mit Sicherheit ausschliessen zu können.

Im Weiteren müssen die normkonformen, vertikalen Verlegetoleranzen von ± 20 mm berücksichtigt werden [4]. Bei ungünstigen Konstellationen können daraus Abweichungen des Gefälles entstehen, die bei gleicher Abflussmenge zu einem etwas höheren Teilfüllungsgrad führen können. Entsprechende Staukurvenberechnungen zeigen, dass bei einer Reduktion des Teilfüllungsgrads auf 77% im theoretisch fehlerlos verlegten Rohr der maximale Teilfüllungsgrad bei der ungünstigsten Konstellation 81% nicht überschreitet. Die beauftragte Firma wendet beim Verlegen der Rohre vertraglich festgelegte Messprinzipien an und betreibt einen hohen Aufwand zur Einhaltung der Verlegetoleranzen. Die Überprüfung einer 150 m langen Teststrecke mit einem Präzisionsnivellement zeigte denn auch ein nur teilweises Ausschöpfen der Verlegetoleranzen. Trotzdem kann nicht ausgeschlossen werden, dass Abweichungen von der Grösse der Toleranzen auch vorhanden sind, solange nicht der gegenteilige Nachweis vorliegt. Da eine genaue Vermessung der ganzen, über 5 km langen Rohrleitungen aber wirtschaftlich unverhältnismässig wäre, scheint die Festlegung des maximalen Teilfüllungsgrads auf 77% richtig.

Neben dem Einhalten des maximalen Teilfüllungsgrads durch die Abflussdrosselung muss auch atmosphärischer Druck über dem Wasserspiegel gewährleistet sein, um das Zuschlagen zu verhindern. Zu diesem Zweck ist an den Stollenenden und in der Stollenmitte beim Gefällswechsel eine Belüftung der Stollenrohre geplant,

	Stollen [m³/s]	Düker [m³/s]	Freispiegelkanal [m³/s]
Nachtminimum	0,20 (0,30)	0,22 (0,32)	0,33 (0,43)
Tagesspitze	0,7 (1,0)	0,8 (1,1)	1,0 (1,3)
Trockenwetterabfluss	0,6 (0,7)	0,7 (0,8)	0,9 (1,0)
Zweifacher Trockenwetterabfluss	1,1 (1,3)	1,2 (1,4)	1,7 (1,9)
Maximalabfluss	2,8 (2,8)	3,3 (3,3)	5,9 (6,7)

2
Dimensionierungsabflussmengen der neuen Überleitung für heute (1996) und in Klammern für die Prognose 2070



3
Das Zuschlagen eines Kanals zwischen zwei Schächten.
a) Eine Störung unterbricht die Luftzirkulation
b) Wellen schlagen an
c) Beginn Druckabfluss
d) Ausblasen der Luft mit druckstossähnlichen Strömungszuständen; Q_a = Luftstrom, V_1 = Geschwindigkeit Wasser, V_S = Geschwindigkeit Störung. Nach McCorquodale und Hamam aus Hager [1]

das heisst in denjenigen Bereichen mit ungleichförmigem Abfluss. Da der abwasserführende Raum streng von den übrigen Räumlichkeiten getrennt ist, müssen die entsprechenden Belüftungsrohre aus dem Stollen heraus geführt werden. In der Stollenmitte ist dies dank des Montageschachts, der bis auf die Belüftungseinrichtung zurückgebaut wird, ohne lange Belüftungsrohre möglich.

Die Abflussmenge in den Abwasserrohren kann rechnerisch ermittelt werden. Die Berechnung mit dem Fliessgesetz nach Darcy-Weisbach unter Anwendung des Widerstandsgesetzes nach Prandtl-Colebrook ergibt für eine Teilfüllung von 77% eine Abflussmenge von 1,40 m^3/s, wobei der Wert für die betriebliche Rauheit zu 0,5 mm angenommen wurde [5]. Der Abfluss, mit einer Froudezahl von 0,6, ist stömend und weist eine Geschwindigkeit von 1,8 m/s auf.

Begrenzung der Abflussmenge

Auf der Seite der Glatt am oberen Ende des Stollens sorgt eine Abflussbegrenzung dafür, dass der – in verschiedenen Messschächten überwachte – maximal zulässige Teilfüllungsgrad in den Stollenrohren eingehalten wird. Der Zufluss bei Regenwetter (10-jährliche Spitze 16,5 m^3/s) muss gedrosselt und über ein Regenklärbecken in die Glatt entlastet werden.

Als Drosselorgane wurden verschiedene Systeme wie zum Beispiel Wirbelventile, Drosselblenden, Drosselschieber, Drosselklappen, Schlauchdrosseln sowie Mess- und Regelstationen mit induktiver Druchflussmessung untersucht. Sicherheitstechnische Überlegungen sprechen gegen geregelte Systeme mit beweglichen Teilen. Vom Verfasser des Bauprojekts wurden schliesslich Drosselblenden den im Vorprojekt enthaltenen Wirbelventilen vorgezogen.

Pro Stollenrohr begrenzt eine nicht verstellbare Öffnung von rund 0,5 × 0,5 m den Abfluss. Je nach Einstauhöhe vor dieser Blende wird der Abfluss unterschiedlich stark gedrosselt. Dieser beträgt beispielsweise bei einem Einstau bis zur Überlaufkante in die Regenklärbecken rund 1,1 m^3/s. Die Drossel sollte ursprünglich bis zum maximal möglichen Wasserstand (Worst-case-Szenario) ohne Steuerung und bewegliche Teile eine rein physikalische Abflussbegrenzung ermöglichen. Die ERZ und der Projektverfasser sahen jedoch davon ab, da die Abflussdrosselung im Normalbetrieb bei einer Auslegung auf den Worst Case zu gross ausfallen würde.

Bei seltenen Glatthochwassern und gleichzeitigem Spitzenabfluss in den ankommenden Kanälen oder auch bei sehr seltenen Hochwassern mit Überflutung im Bereich der Bauwerke Glatt steigt der Wasserspiegel über der Drossel so hoch an, dass die Stollenrohre geschlossen werden müssen. Nur so kann verhindert werden, dass zuviel Wasser in die Stollenrohre gelangt und letztere zuschlagen.

Es ist Sache des zukünftigen Betreibers, ein Warnsystem zu organisieren, um die Stollenrohre rechtzeitig zu schliessen. Um diese Notschliessung bei den nur selten auftretenden Hochwassern sicherzustellen, sind jährliche Funktionskontrollen notwendig.

Notentlastung am Stollenende

Die Notentlastung in die Limmat begrenzt den maximalen Wasserspiegel im Einlaufbauwerk des Dükers, das sich unmittelbar am unteren Stollenende befindet, und verhindert so einen Rückstau in die Stollenrohre. Sie springt im Normalbetrieb auch bei Starkregen nur in ausserordentlich seltenen Fällen an. Im Störfall, bei verstopften oder geschlossenen Dükerrohren, vermag die Notentlastung die gesamte Wassermenge von maximal 3,3 m^3/s auch bei einem seltenen Limmathochwasser von 600 m^3/s abzuleiten. Der Wasserspiegel der Limmat liegt dann bereits 0,3 m über der Rohrsohle der am unteren Stollenende ausmündenden Rohre. Trotzdem kann der Einstau der Stollenrohre auch bei maximalem Abfluss in der Überleitung dank der Notentlastung verhindert werden.

Der bei einer Wellenfront aus dem Stollen zuströmende Luftstrom von theoretisch maximal rund 2,8 m^3/s, entsprechend der maximalen Wassermenge, entweicht ebenfalls durch die Notentlastung. Da deren Einlauf in die Limmat bei Hochwasser eingestaut ist, sind zusätzliche Lüftungsöffnungen über dem maximalen Wasserspiegel der Limmat eingebaut.

Abschluss der ersten Bearbeitungsphase und Ausblick

Die erste Bearbeitungsphase des Gesamthydraulikers wird mit einer Dokumentation der Projektierung bis und mit dem Ausführungsprojekt abgeschlossen. Die Beurteilung von Ausführungstoleranzen und der tatsächlichen Ausführung wird Gegenstand der weiteren Bearbeitung sein, ebenso die Begleitung der Bauherrschaft während der Inbetriebsetzung und des halbjährigen Probebetriebs. Unter Umständen wird es sinnvoll sein, die erwähnte Dokumentation der Projektierung um die Erfahrungen aus dem Probebetrieb zu erweitern, um so dem zukünftigen Betreiber eine vollständige Grundlage zur Verfügung stellen zu können.

Adresse der Verfasser:
Heinz Kaspar, dipl. Ing. ETH, und *Michael Aggeler*, dipl. Ing. ETH, Basler & Hofmann, Ingenieure und Planer AG, Forchstrasse 395, 8029 Zürich

Literatur

[1]
Hager W.H.: Zuschlagen von teilgefüllten Rohren. gwf-Wasser/Abwasser 136 Nr. 4, S. 200–210, 1995

[2]
Hager W.H.: Abwasserhydraulik, Springer-Verlag, S. 92–95, 1994

[3]
Vischer D.: Das Zu- und Aufschlagen eines geschlossenen Kanals. gwf-Wasser/Abwasser 134 Nr. 8, S. 492–497, 1993

[4]
Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein: Empfehlung SIA V 190: Kanalisationen. Zürich 1993 (in verlängerter Vernehmlassung)

[5]
ATV: Richtlinien für die hydraulische Dimensionierung und den Leistungsnachweis von Abwasserkanälen und -leitungen. Arbeitsblatt A 110, 8/1988