

# Hydraulische Modelluntersuchungen der Limmatunterquerung der Zürcher Schnellbahn

Autor(en): **Taus, Karl / Chervet, André**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizer Ingenieur und Architekt**

Band (Jahr): **103 (1985)**

Heft 13

PDF erstellt am: **24.09.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-75745>

## **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.

# Hydraulische Modelluntersuchungen der Limmatunterquerung der Zürcher Schnellbahn

Von Karl Taus und André Chervet, Zürich

Zwischen dem Bahnhofquai und dem Neumühlequai in Zürich - ungefähr im Fluss km 1,250 - soll die Zürcher S-Bahn künftig die Limmat in einem doppelspurigen Eisenbahntunnel unterqueren. Der fertige Tunnel wird den Abfluss nicht beeinträchtigen, wohl aber provisorische Einbauten in der Limmat während der Bauarbeiten. Um die Auswirkungen dieser Eingriffe in den heutigen Flusslauf klären und die Risiken beurteilen zu können, beauftragten die Schweizer Bundesbahnen die Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich mit der Durchführung von Modellversuchen.

Mit Hilfe eines hydraulischen Modells wurden zunächst die vom Projektverfasser Basler & Hofmann, Ingenieure und Planer AG vorgesehenen konventionellen Bauzustände und daran anschliessend die von einer Arbeitsgemeinschaft eingereichte Variante (mit Anwendung des Gefrierverfahrens) hinsichtlich des Rückstaus, der Strömungsverhältnisse im Bereich der Baugruben, der Ufersicherheit, des Kolkgeschehens und der Auswirkungen der Bauzustände auf die Schifffahrt untersucht. Die Autoren beschreiben die Versuche am Modell und nennen die Ergebnisse eines Variantenvergleichs.

## Projekte

Von den zuerst untersuchten Varianten zum Bau der Limmatunterquerung wurde die sogenannte «Deckelbauweise in trockenen Baugruben» ausgeschrieben. Zu den allgemeinen Bedingungen der Ausschreibung gehörten zusätzliche Bestimmungen und Randbedingungen für die Ausarbeitung einer Variante, die das Unterqueren der Limmat mit Hilfe des Gefrierverfahrens ermöglicht.

Die anhand erster Modellversuche zur Ausschreibung gewählte Deckelbauweise in trockenen Baugruben im Dreitaktverfahren (anstelle von Viertaktverfahren) sah vor, in der Limmat drei offene Baugruben nacheinander zu errichten. Es war geplant, am linken Ufer anzufangen (Bauetappe 1), anschliessend sollte der rechtsuferige Teil (Bauetappe 3) und zuletzt der mittlere Teil (Bauetappe 2) erstellt werden. Die Lage der Baugruben ist aus Bild 1 ersichtlich.

Geplant war, jede Baugrube zuerst zu umpunden und dann mit Material aufzufüllen. Dem Absenken der Schlitzwände sollte das Betonieren und Abdichten des Deckels folgen. Nach Fertigstellung aller drei Bauetappen sollte der Tunnel ausgehoben, die Sohle betoniert und das ganze Bauwerk abgedichtet werden. Für den unter der Limmat entstehenden fugenlosen Betonkasten war eine Bauzeit von etwa 3 Jahren angesetzt. Bild 2 zeigt den künftigen Eisenbahntunnel im Quer- und Längsschnitt. Es war zu erwarten, dass diese offenen Baugruben zu einer Einschnürung des Abflussquerschnitts führen, verbunden mit Rückstau und Auskolkung der Sohle.

Eine Arbeitsgemeinschaft, bestehend aus der Locher & Cie. AG, der Ad. Züblin & Cie. AG, der Walo Bertschinger AG und der Schafir & Mugglin AG, erarbeitete eine Variante für die Anwendung des Gefrierverfahrens, bei der nur eine einzige Baugrube in der Limmat am rechten Flussufer notwendig ist. Um diese Baugrube und am rechten Limmatufer sollte eine Arbeitsplattform auf Pfählen ruhen. Zur Sicherstellung des Gefrierverfahrens muss die Limmatsohle derart isoliert werden, dass ein Kälteeinfluss des Frostkörpers auf das Limmatwasser ausgeschlossen ist. Dazu ist es notwendig, eine Isolation aus hochwertigen Schaumstoffen über den ganzen Frostkörper an der vorher eingeebneten Limmatsohle aufzubringen.

Um die sehr bescheidene Firstüberdeckung bis zur Flusssohle zu verbessern, ist gleichzeitig mit einem Verdichten der durchlässigeren Schichten eine Aufschüttung von etwa 50 bis 70 cm vorzunehmen. Diese einige Meter tief reichende Verdichtung des Flussgrun-

des erreicht man mit dem Rütteldruckverfahren (RDV).

Zum Verhindern unzulässiger Strömungen des Grundwassers, die die Bodenvereisung in Frage stellen könnten, ist zusätzlich zum RDV beidseits des Frostkörpers eine Spundwand im Flussgrund bis in die dichteren Seeablagerungen zu schlagen. Beim Bahnhofquai muss zudem mit einer vertikalen Schürze der Grundwasserstrom blockiert werden. Die Isolation wird über die bereits beschriebene Aufschüttung gelegt.

Dadurch entsteht während der Bauzeit quer zum Fluss eine Schwelle mit der Kote etwa 402.95 m ü.M. Diese etwa 70 cm hohe Schwelle dürfte natürlich den Abfluss behindern und eine gewisse Erhöhung des Wasserspiegels im Flussteil oberhalb der Baustelle erzeugen. Unterhalb der Schwelle könnte eine Kolkung auftreten.

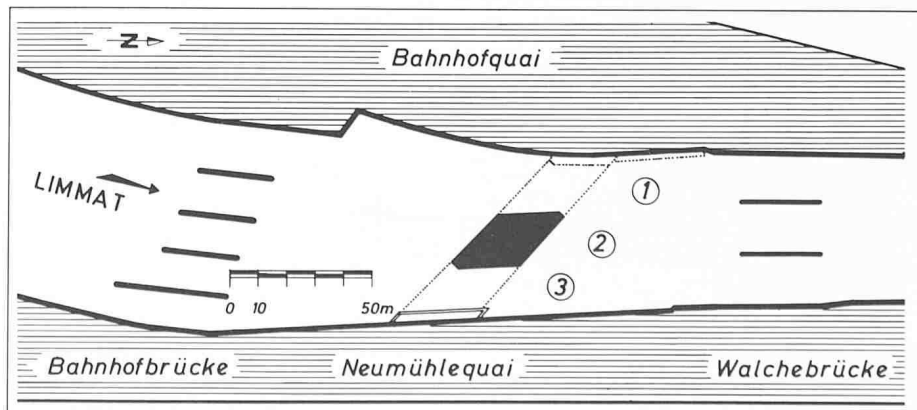
Am linken Flussufer, gerade über der Schwelle, wäre zusätzlich noch ein Schwimmblock (6,75 m breit, 22,84 m lang, mit einem Tiefgang von 86 cm) befestigt. Dieses Block sollte eine Tragkraft von etwa 84 t haben und rund 32 cm aus dem Wasser herausragen.

Die Lage der 8,40 m breiten und etwa 23,30 m langen Baugrube mit den Pfählen und die der Schwelle zeigt Bild 3, einen Querschnitt der Schwelle Bild 4.

## Modell

Für die Durchführung der Untersuchungen wurde ein Modell im Massstab 1:40 gebaut. Die im Modell nachgebildete Limmat-Flussstrecke reicht vom Fluss km 0,990 (etwa 110 m vor der Bahnhofbrücke) bis zum km 1,450 (etwa 100 m unterhalb der Walchebrücke). Der Nullpunkt der Flusskilometrierung liegt bei der Quaiabücke. Der obere Modellteil bis zum Querprofil in km 1,163 und der untere Teil vom km 1,400 an bis zum Modellende sind mit einer festen betonierten Sohle verse-

Bild 1. Lage der vorgesehenen Baugruben 1 bis 3 in der Limmat



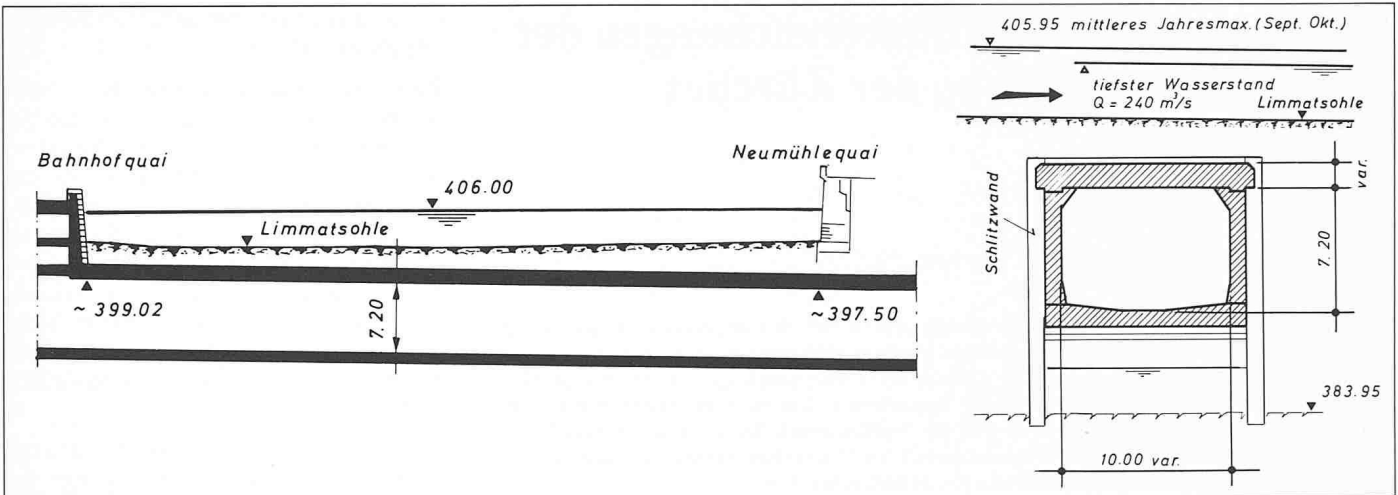


Bild 2. Quer- und Längsschnitt des zukünftigen Eisenbahntunnels unter der Limmat

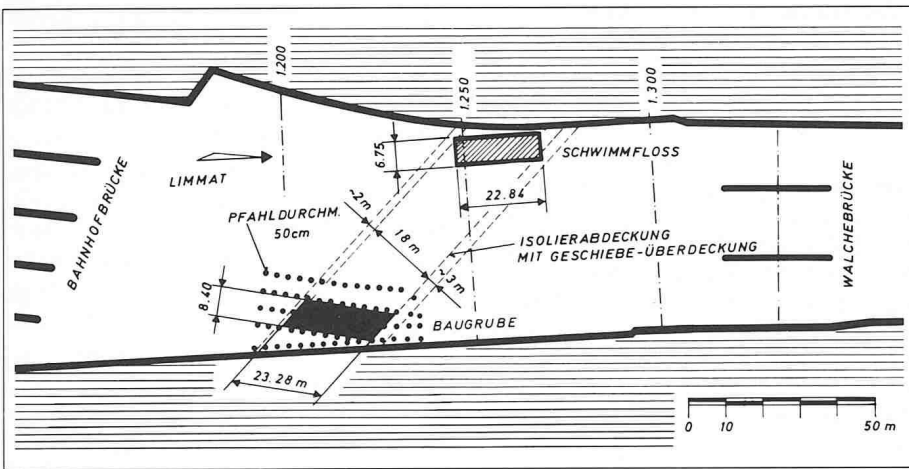


Bild 3. Lage der Einbauten für das Gefrierverfahren

Bild 4. Querschnitt der Schwelle im Fluss

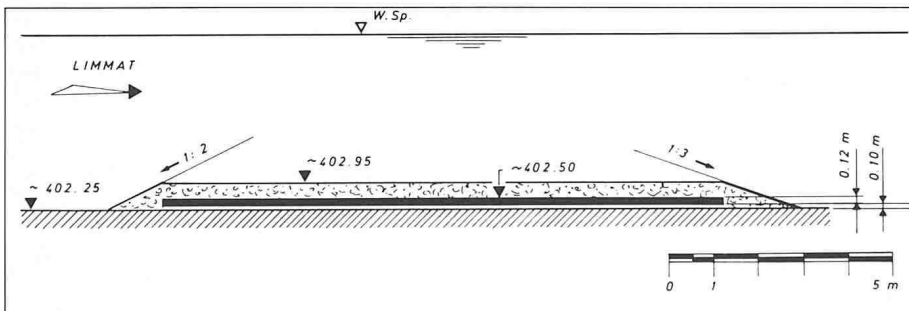
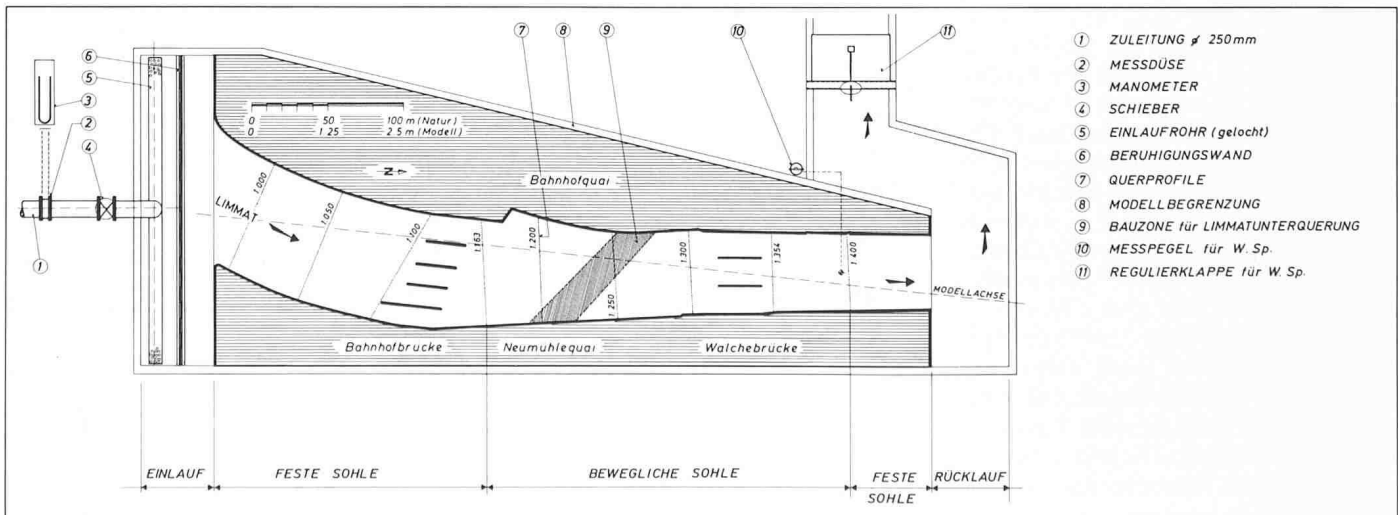


Bild 5. Modellgrundriss mit allen Installationen



hen. Auf der restlichen Modellstrecke sind nur die Ufermauern und die Pfeiler aus Beton nachgebildet, die Flusssohle selbst ist beweglich. Bei den Untersuchungen wurde das Froudesche Ähnlichkeitsgesetz angewandt. Bild 5 zeigt das gesamte Modell im Grundriss.

Die Festlegung des Modellmassstabs auf 1:40 verlangte eine Anpassung der aus Sondierbohrungen (Messkampagne 1982) gegebenen Kornverteilungskurve bei der Nachbildung der Sandmischung im Modell. Bei der gegebenen Kurve war der Anteil der Feinkomponenten (< 10 mm), die im Modell wegen dessen Massstab und des Auftretens von Kohäsionseffekten bei Körnern kleiner als etwa 0,25 mm nicht nachgebildet werden konnten, gross. Bei Verwendung von Material mit gleicher Dichte wie in der Natur musste für das Modell eine neue Kornverteilungskurve berechnet werden, bei der ausschliesslich Material von Korndurchmessern grösser als 0,26 mm, d.h. 10,4 mm in der Natur, vorkam.

Beim Kolk bzw. Erosionsvorgang sind bekanntlich vor allem die grösseren Kornfraktionen für den Widerstand einer aus beweglichem Material beste-

henden Schicht massgebend. Dies bedeutet, dass für die untersuchte Strecke, wo die Limmatsohle aus Moränenablagerungen besteht, die im Modell getroffene Simulation der beweglichen Sohle nach Bildung einer Deckschicht einigermassen den gleichen Widerstand gegen Erosion wie in der Natur garantiert. Sofern das effektive Limmatbett im grossen ganzen aus homogenem Material besteht und die hydraulisch bedingten Beanspruchungen der Sohle korrekt nachgebildet werden, dürfte die eingebaute Sandmischung ein Bild des Naturvorgangs liefern. Dabei ist zu beachten, dass bei der Simulation eines Bettbildungsvorgangs mit beweglichem Material diverse vereinfachende Annahmen getroffen werden müssen und somit die Ergebnisse bezüglich Kolk qualitativen Charakter haben.

Der maximal zu berücksichtigende Limmatabfluss wurde, gemäss Erfahrungen aus früheren Limmatuntersuchungen, mit 370 m<sup>3</sup>/s angenommen. Das Reglement für die Regulierung der Wasserstände des Zürichsees, nach dem aufgrund eines Bundesbeschlusses und mit Zustimmung der Anliegerkantone der Wasserspiegel des Zürichsees in bestimmten Grenzen gehalten wird, sieht vor, für Nieder- und Mittelwasserführung der Limmat Seestände zwischen 405,45 und 406,15 m ü.M. mit dem Regulierwehr am Platzspitz zu halten.

Verläuft die Seestandskurve im Bereich oberhalb der Kote 406,15 m ü.M. (Hochwasser), so ist die Abflussmenge, welche der von den Seestandskurven zuletzt geschnittenen Regulierlinie zugeordnet ist, in der Limmat einzustellen. In Bild 6 sind die Grenzwerte der Seespiegelschwankungen laut Reglement für  $Q < 240 \text{ m}^3/\text{s}$  eingetragen. Bei höheren Abflüssen ist die Abhängigkeit eindeutig. Der Schwankungsbereich des Zürichsees ist infolge der Reguliereinrichtungen im Vergleich zu unregulierten Seen relativ klein. Der langjährige Schwankungsbereich (1952-1980) beträgt lediglich 50 cm.

Für die im Modell benützte Abflusskurve in km 1,400 (am Modellende, wo der Referenzpegel installiert war) wurden die Wasserspiegellagen einer Computerberechnung entnommen. Dabei nahm man im Bereich der Seespiegelschwankungen (also bis 240 m<sup>3</sup>/s) die tiefsten Seespiegelwerte an. Die so entstandene Abflusskurve für das Pegelprofil in km 1,400, wo der Wasserspiegel im Modell bei allen Versuchen eingestellt wurde, liegt somit auf der sicheren Seite, d.h., die eingestellten Wasserspiegellagen sind die tiefsten, die in der Regel vorkommen können.

Die Eichung des Modells, d.h. die Prüfung, ob ein in der Natur beobachteter

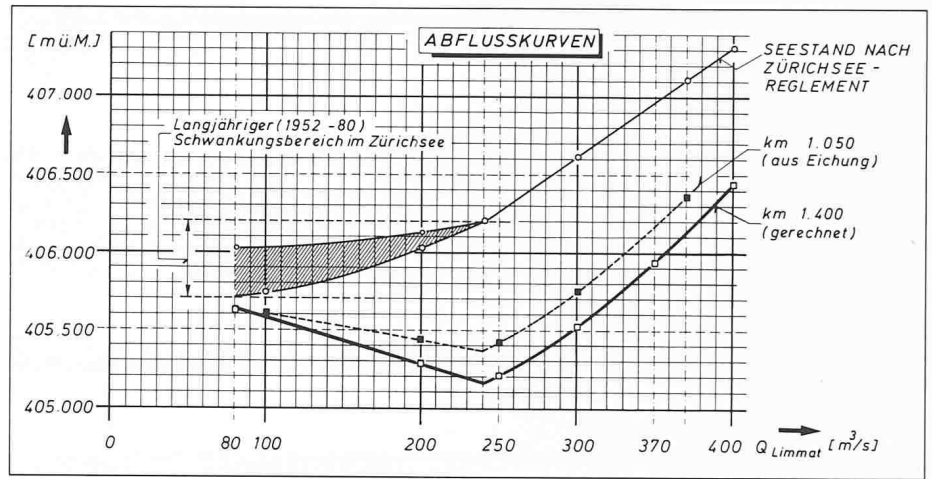


Bild 6. Abflusskurven der Limmat

oder auf andere Weise (z.B. rechnerisch) bestimmter Zustand sich im geometrisch ähnlichen Modell bezüglich Wassermenge und Wasserspiegellage auch wirklich nachbildet, verlief zufriedenstellend. Die im Modell gemessenen Wasserspiegellagen, umgerechnet auf Naturwerte, stimmen gut mit den in der Natur beobachteten überein. Somit kann das Modell bezüglich den Wasserständen als naturgetreu betrachtet werden.

### Modellversuche

#### Bestimmung der Wasserstände

Nach der Modelleichung wurden die Wasserstände in einer ersten Serie von Versuchen auf der ganzen Modellstrecke im Zustand ohne Einbauten bestimmt. Die Ergebnisse dienten als Ausgangszustand für die Ermittlung des Rückstaus bei allen folgenden Versuchen.

Zur Bewältigung des Materialtransports während des Baues mit der Variante «Deckelbauweise in trockenen Baugruben» ist vorgesehen, unterhalb der Baustelle eine Dienstbrücke zu errichten, die auf in das Flussbett gerammten Pfählen zu stehen kommt. Die oberen Pfahljoche sollen mit einer Brettverschalung versehen werden, um die Schifffahrt sicherer zu machen.

Um den Rückstau dieser ersten Einbauten zu ermitteln, wurden Wasserspiegelmessungen durchgeführt. Der Rückstau in km 1,050 war klein (zwischen 0 cm bei 100 m<sup>3</sup>/s und 4 cm bei maximalem Hochwasser). Auch die Behinderung der Strömung war gering; lediglich entlang des linken Ufers, wo die Pfahljoche etwas quer zur Strömung stehen, bewirkten sie eine Umlenkung der Strömung, die leichte lokale Kolke verursachte.

Die erste Bauetappe der Deckelbauweise in trockenen Baugruben (Baugrube

entlang des linken Ufers am Bahnhofquai) wurde mit eingebauter Dienstbrücke und einer 3 m breiten Schlitzwand entlang des rechten Ufers (Neumühlequai) untersucht. Diese linke Baugrube beanspruchte flächenmässig - relativ zu den Phasen 2 und 3 - das Abflussprofil, das zusätzlich noch durch die erwähnte Schlitzwand am rechten Ufer verengt war, am stärksten.

Nach demselben Verfahren wie beim Ausgangszustand wurden die Wasserspiegellagen in Funktion des Abflusses über die gesamte Modellstrecke gemessen. Die Abflussbilder (in Bild 7 sieht man ein Beispiel der Oberflächenströmung der 1. Bauetappe beim Abfluss von 300 m<sup>3</sup>/s) zeigen die starke Einschnürung der Strömung infolge der Baugrube und der Schlitzwand. An den scharfen Kanten der Spundwände entstanden Stromablösungen, die den Abflussquerschnitt weiter verengten. An der Sohle entwickelte sich eine Kolkwanne. Hinter der Baugrube entstand eine Wirbelzone mit Rückwärtsströmung, welche die linke Öffnung der Walchebrücke teilweise abschirmte. Dadurch wurde die Durchflusskapazi-

Tabelle 1

Abfluss m <sup>3</sup> /s	Rückstau in cm bei km 1,050		
	1. Bauetappe	2. Bauetappe	3. Bauetappe
100	3	2	1
200	11	9	7
250	16	14	11
300	19	20	14
370	21	20	16

Tabelle 2

Abfluss m <sup>3</sup> /s	Rückstau in cm	
	ohne Floss	mit Floss
100	1	2
200	7	8
250	12	14
300	14	17
370	15	17

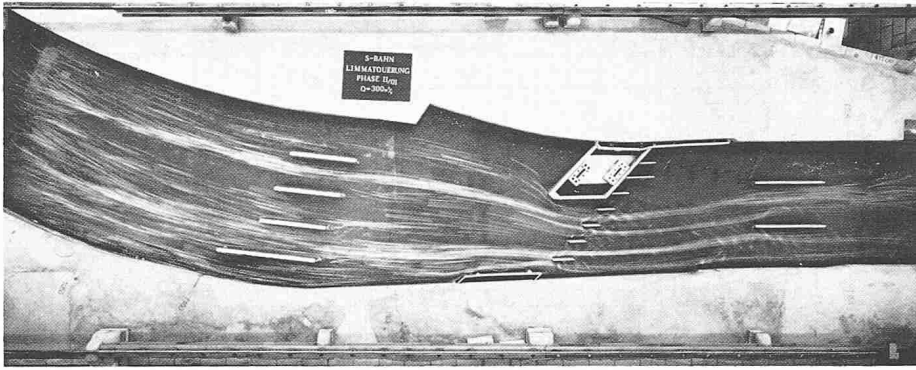


Bild 7. Oberflächen-Strömungsbild des Abflusses von 300 m<sup>3</sup>/s bei der ersten Bauetappe (Baugrube entlang des linken Ufers)

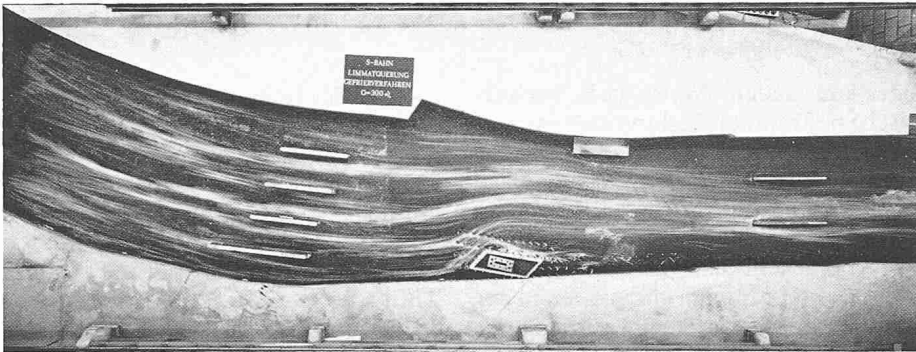


Bild 9. Oberflächen-Strömungsbild des Abflusses von 300 m<sup>3</sup>/s bei der Unternehmervariante mit Gefrierverfahren

tät dieser Öffnung verringert, und in der gesamten Zone kam es zu Sedimentablagerungen. Die Strömungsbilder zeigen auch eine schräge Anströmung der Pfeiler der Walchebrücke.

Eine der Baugrube vorgelagerte Leitwand übte einen günstigen Einfluss auf den Wasserspiegelverlauf im Bereich der eigentlichen Baugrube aus, wo der Übergang (Absenkung des Wasserspiegels bei der Spundwandkante) nicht mehr so abrupt vor sich ging. Dadurch wurde die Kolktenz reduziert. Diese günstige Entwicklung der Sohle im Bereich der Baugrube wirkte sich bezüglich des Rückstaus so aus, dass der Wasserspiegel im Referenzprofil eher höher zu liegen kam, als wenn neben

der Baugrube eine Kolkwanne entstanden wäre.

Die zweite und die dritte Bauetappe wurden ähnlich untersucht. Tabelle 1 fasst die Rückstauwerte aller drei Bauetappen der Deckelbauweise in trockenen Baugruben zusammen. Die Werte enthalten die Einflüsse der Dienstbrücke und der rechtsuferigen Schlitzwand.

In der Projektentwicklung erübrigte sich zunächst die rechtsuferige Schlitzwand. Dadurch reduzierten sich die Rückstauwerte bei den Bauetappen 1 und 2 je nach Abfluss um 1 bis 4 cm.

Die Differenzen im Rückstau der einzelnen Baugruben können auch auf das ungleiche Verbauungsverhältnis (ver-

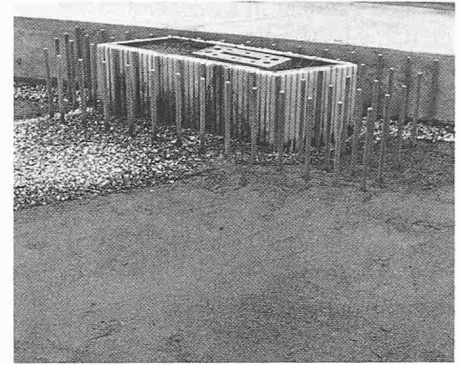


Bild 8. Baugrube mit den Pfählen am rechten Ufer bei der Unternehmervariante

baut Querschnittsfläche zur gesamten Abflussfläche) zurückgeführt werden. Beispielsweise war die linke Baugrube flächenmässig die grösste, die rechte dagegen strömungstechnisch die günstigste. Gegen die Fliessrichtung in Richtung See werden die in der Nähe der Baugrube bei Hochwasser bestimmten Rückstauwerte sukzessive abgebaut. Im See dürfte der Rückstau maximal die Hälfte der angegebenen Werte erreichen, und das nur in dem Fall, wenn das beträchtliche Retentionsvolumen des Zürichsees bereits erschöpft ist. Diese generelle Aussage kann man aufgrund einer Auswertung von Staukurvenberechnungen machen.

Für die Variante mit Gefrierverfahren (Bild 8) wurde der Wasserspiegelverlauf ebenfalls für alle fünf im Modell nachgebildeten Abflüsse ermittelt. Bild 9 zeigt ein Beispiel der Oberflächenströmung.

Um den Einfluss des Schwimfflosses am linken Ufer zu bestimmen, wurden die Wasserspiegelmessungen mit und ohne Floss durchgeführt. Die Messungen ergaben die in Tabelle 2 angegebenen Rückstauwerte in km 1,050.

Berücksichtigt man die Messgenauigkeit, so zeigt sich, dass das Floss einen zusätzlichen Rückstau in der Grössen-

Bild 10. Kolk nach Abfluss von 250 m<sup>3</sup>/s über sechs Tage (Natur) bei der 1. Bauetappe ohne Kolkenschutzmassnahmen der Variante mit drei offenen Baugruben

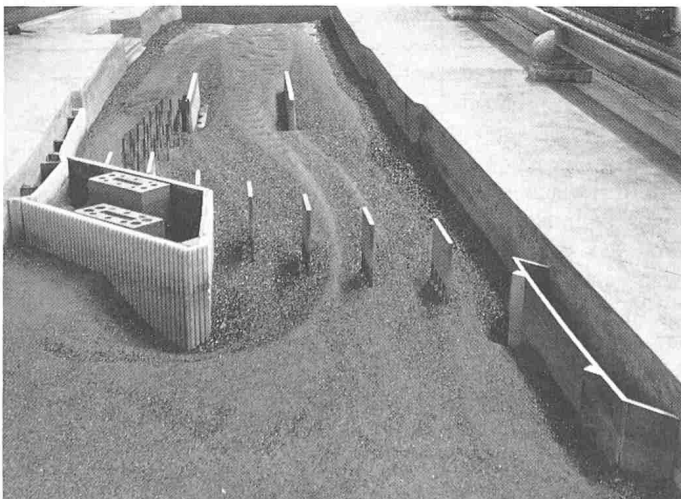


Bild 11. Kolkbild nach dem Hochwasserabfluss bei der zweiten Bauetappe ohne Kolkenschutzmassnahmen

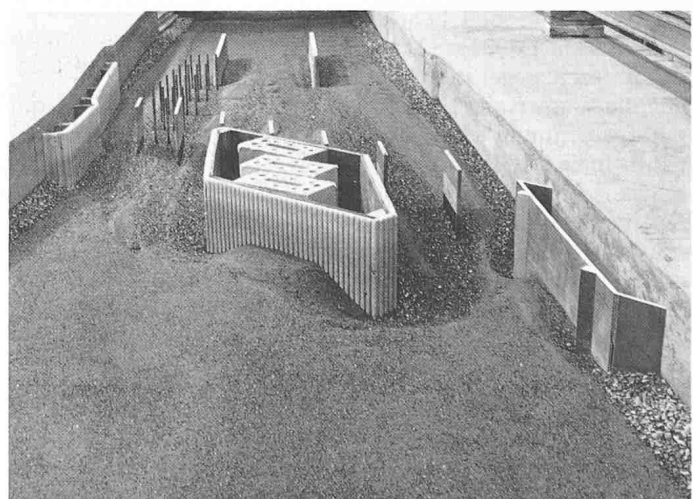




Bild 12. Eingebauter Kolkenschutz durch Steinschüttung in den am meisten gefährdeten Zonen (2. Bauetappe)

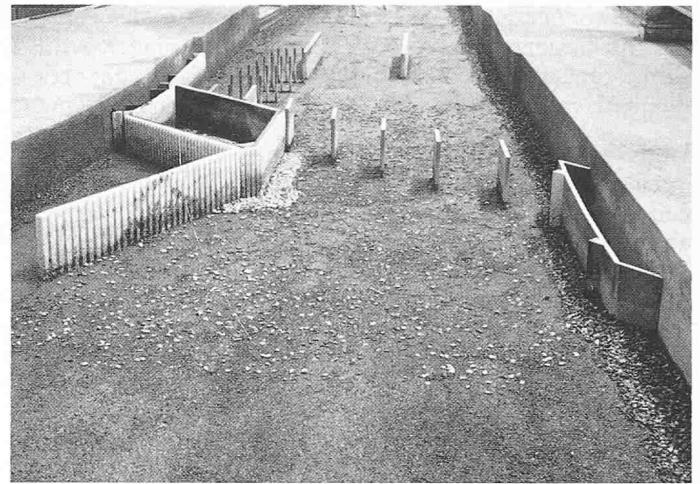


Bild 13. Deckschichtverstärkung und Kolkchutz vor dem Versuch mit 250 m<sup>3</sup>/s über sechs Tage (Natur); erste Bauetappe mit Leitwand

ordnung von 1 bis 3 cm in Naturwerten verursacht. Im übrigen sind die Rückstauwerte gleich hoch wie bei der günstigsten Baugrube (3. Bauetappe am rechten Ufer).

Eine Schwelle im Fluss hat, hydraulisch gesehen, dieselbe Wirkung wie eine Baugrube: Sie verengt das Abflussprofil. Der Rückstau wird hier hauptsächlich von der Schwelle hervorgerufen (O.K. Schwelle 402.95 m ü.M. – Schwellenhöhe etwa 70 cm). Bei niedrigerer Schwelle nehmen die Rückstauwerte ab.

### Kolk und Ufersicherungsversuche

Die Strecke der Limmat zwischen Bahnhofbrücke und Walchebrücke liegt im Rückstaubereich des Wehres Letten. Wie Berechnungen und auch die Vorversuche ohne Einbauten im Modell zeigten, ist die Sohle im betreffenden Abschnitt für alle im Rahmen des Zürichseereglements auftretenden Abflusszustände stabil, d.h., es kann sich kein Geschiebetrieb entwickeln. Mit den vorgesehenen Einbauten in die Limmat ändert sich die Lage. Deshalb

wurden parallel zu den Wasserstandsmessungen auch umfangreiche Kolk- und Erosionsversuche für die zu untersuchenden Varianten durchgeführt.

Für die Limmat ist jede der vorgesehenen Baugruben ein bedeutendes Hindernis in der Strömung, da die Verbauung den natürlichen Abflussquerschnitt verkleinert. Da der gesamte Abfluss durch diese Engstellen fließen muss, steigen dort naturgemäss die Fliessgeschwindigkeiten und damit auch die Schleppkräfte. Die auf die Sohle wirkenden erhöhten Kräfte führen zum Geschiebetransport. Dazu bewirkt noch die Umlenkung der Strömung bei einem Hindernis die Auskolkung der Sohle. Das ausgewaschene Geschiebmaterial wird im Schatten der Spundwände und in den Rückströmungsbereichen teilweise abgelagert, der Rest wird weiter flussabwärts transportiert. Bei späteren Hochwasserabflüssen könnte das Geschiebe allenfalls bis in den Zulauf des Kraftwerks Letten gelangen, was zu verhindern ist. Deshalb sollte man anstreben, die Kolke und Erosionen möglichst gering zu halten.

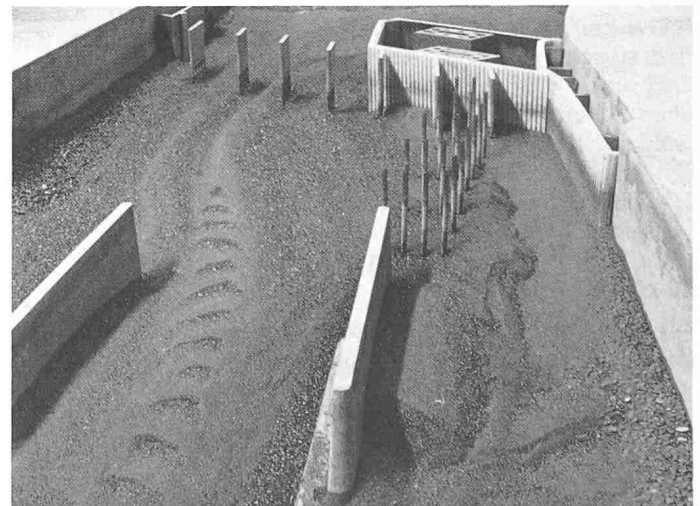
Bei jedem Kolkversuch wurde die Modellstrecke einem Abfluss von 250 m<sup>3</sup>/s über sechs Tage (Natur) ausgesetzt. Diese Abflussmenge wurde beispielsweise im Jahr 1978 während rund sechs Tagen erreicht bzw. überschritten. Somit wurden recht extreme Bedingungen angenommen, bei denen die Wasserspiegellage am tiefsten liegt.

Die im Modell eingebrachte Limmatsohle war vor den Kolkversuchen nur während relativ kurzer Zeit mit kleinen Abflüssen beansprucht, konnte also nicht einen während Jahrzehnten in der Natur abgelaufenen Prozess der Abpflasterung und Konsolidierung der Sohle durchmachen. Es ist deswegen anzunehmen, dass die im Modell aufgetretenen Kolkungen bezüglich des Ausmasses und der Tiefe eher zu ungünstig ausfallen. Andererseits kann wegen des Weglassens der feinsten Komponenten in der Sohlenmischung auch eine zu günstige Prognose bezüglich der Ausdehnung der Kolke und Auflandungen erwartet werden. Deshalb müssen die absoluten Zahlen der Sohlenänderungen mit Vorsicht betrachtet werden.

Bild 14. Kolkbild nach dem Versuch (gemäss Bild 12); maximale Kolkiefen etwa 1,60 m



Bild 15. Beispiel von Auflandungen nach Hochwasserabfluss (gegen die Fliessrichtung betrachtet)



Die gewonnenen Resultate haben somit, im Gegensatz zu den Wasserspiegelmessungen, nur einen relativen und qualitativen Charakter.

Wichtig war, dass immer die gleichen Versuchsbedingungen eingehalten wurden. Dadurch lässt sich allerdings kein absolutes Mass bezüglich der Tiefe der Kolklöcher beim Auftreten eines Hochwassers ableiten. Dennoch lassen sich die erosions- bzw. kolkempfindlichen Stellen der Sohle anhand von Vergleichen zwischen dem Ausgangszustand und den erhaltenen Endzuständen der Versuche gut abschätzen. Die Wirksamkeit von Kolkschutzmassnahmen kann ebenfalls in relativen Vergleichen gut ermittelt werden.

Die Kolkung beginnt an den Kanten der Spundwände und breitet sich in der Längs- und Querrichtung aus. Mit wachsendem Abfluss werden die Kolklöcher und die Ablagerungen umfangreicher. Aus statischer Sicht bedeuten die Kolke auch eine Gefahr für die Spundwände. Die Auflandungen bringen eine unerwünschte Beeinträchtigung des Abflussquerschnitts unterhalb der Einengung mit sich. Im allgemeinen wird versucht, mit geeigneten Massnahmen die Kolkung zu verhindern oder auf ein zulässiges Mass zu begrenzen. Dies wurde im Modell mit verschiedenen Massnahmen (Steinschüttungen, Steinteppichen, Deckschichtverstärkungen, Leitwänden) versucht. Die Bilder 10 bis 15 zeigen einige Beispiele von Kolk und Kolkschutzmassnahmen.

Als wirksame Kolkschutzmassnahmen haben sich Steinschüttungen entlang der Spundwände, kombiniert mit einer Deckschichtverstärkung der Flusssohle, zwischen km 1,200 und 1,300 bewährt. Bei der Bauetappe 1 konnte zusätzlich der Einbau einer Leitwand empfohlen werden.

Da der Zustand der Uferbefestigungen nicht genau bekannt ist, wird empfohlen, die Ufer beidseitig im Bereich zwischen km 1,200 und km 1,300 zusätzlich zu schützen. Die Pfeiler der Walchebrücke benötigen keinen zusätzlichen Schutz. Es wird aber empfohlen, während der Bauperiode beim Auftreten eines Hochwassers die Ufersicherungen und die Blockwürfe regelmässig zu beobachten und zu kontrollieren, um allfällige Veränderungen feststellen zu können.

Will man den Rückstau mindern oder gar ausschalten, muss der Wasserspiegel unterhalb der Baustelle bedeutend abgesenkt werden. Dadurch verstärkt sich die Kolkung, und der Materialtransport im unteren Flussteil steigt, so dass die Gefahr besteht, dass im Stau-

raum des Kraftwerkes Letten Material abgelagert wird. Deswegen ist bei Abflüssen über etwa 200 m<sup>3</sup>/s Vorsicht geboten, d.h., man sollte nicht die Limmatsohle übermässig beanspruchen.

Schon bei den Wasserspiegelmessungen mit der Unternehmervariante zeigte sich, dass die vorgesehenen Einbauten keinen markanten Einfluss auf die Sohlenstabilität haben. Bei Abflüssen bis zu 250 m<sup>3</sup>/s wurde keine Geschiebebewegung auf der Sohle beobachtet. Bei höheren Abflüssen wurde infolge der Wirbel rund um die Pfähle feines Material ausgespült, über die Schwelle transportiert und dahinter abgelagert.

Die Ursachen dieser Sohlenstabilität dürften sein:

- Die Spundwände der Baugrube sind durch eine 3 m breite Steinschüttung umfassend gegen Kolke geschützt;
- die Baugrube, bloss 8,40 m breit, ist bedeutend kleiner als die offenen Baugruben, und somit ist die Umlenkung der Strömung geringer;
- die über die ganze Breite sich erstreckende 70 cm hohe Schwelle staut das Wasser gleichmässig oberhalb der Baugrube auf; dieser Stau verhindert örtliche Kolkungen.

Der Kolkversuch mit 250 m<sup>3</sup>/s über sechs Tage (Natur) bestätigte diese Beobachtungen. Die Sohle blieb überall stabil, auch flussabwärts der Schwelle. Somit wurde kein Material in Bewegung gesetzt.

Man kann also festhalten, dass ein Hochwasser von 250 m<sup>3</sup>/s über sechs Tage keine Gefahr für die Flusssohle und die Ufer mit sich bringt. Die erwähnten Sicherungsmassnahmen (Steinschüttungsschutz der Spundwände, Steinschüttung vor und hinter der Schwelle) reichen völlig aus.

### Limmatschiffahrt

Da die Limmatschiffahrt auch während der Bauzeit bis zu einem Abfluss von etwa 180 m<sup>3</sup>/s aufrechterhalten werden soll, wurden die Fliessgeschwindigkeiten bei allen Bauphasen in den kritischen Stellen für 100 und 200 m<sup>3</sup>/s ermittelt. Dabei sind die Werte für 200 m<sup>3</sup>/s entscheidend. Die maximalen Geschwindigkeiten wurden bei allen Bauphasen im Baugrubenbereich und unter der Dienstbrücke gemessen. Normalerweise verläuft die Fahrbahn entlang des rechten Ufers, bei den Bauphasen 2 und 3 muss die Fahrbahn gewechselt werden. Die maximalen Fliessgeschwindigkeiten steigen von 1,50 m/s ohne Einbauten bis auf etwa 2,30 m/s bei 200 m<sup>3</sup>/s im Bereich der Einengungen. Die Schiffahrt könnte also während des Baues mit der gebotenen Vorsicht aufrechterhalten werden.

Bei der Unternehmervariante sollte die Schiffahrt weniger behindert sein als bei den Baugruben. Allerdings ist die Schwelle ungefähr 70 cm hoch, was das Abflussprofil verringert und über der Schwelle die Geschwindigkeiten ansteigen lässt. Die maximale Geschwindigkeit wurde mit 2,4 m/s ermittelt. Die mittleren Abflusstiefen über der Schwelle betragen bei 100 m<sup>3</sup>/s rund 2,60 m und bei 200 m<sup>3</sup>/s etwa 2,30 m. Das ist für die relativ flachen Limmatschiffe ausreichend.

### Variantenvergleich

Beide Varianten sind aufgrund der Modellversuche aus hydraulischer Sicht durchführbar. Folgende Unterschiede liessen sich jedoch beobachten:

- Der Rückstau weist bei beiden Varianten ungefähr die gleichen Werte auf. Beim Gefrierverfahren könnte man eventuell durch Verminderung der Schwellenhöhe die Rückstauwerte noch etwas reduzieren.
- Die Kolkverhältnisse sind bei der Unternehmervariante eindeutig günstiger. Es sind keine zusätzlichen Kolkschutzmassnahmen notwendig. Werden die Spundwände der verkleinerten Baugrube mit Steinschüttung geschützt, bleiben die Flusssohle und die Uferbefestigungen auch bei Hochwasserabflüssen stabil.
- Die Fliessgeschwindigkeiten sind beim Gefrierverfahren über der Schwelle höher als in den Einengungen bei der Projektvariante. Auch sind hier die Wassertiefen geringer; hingegen wird die Schiffahrt durch flächenmässig kleinere Einbauten weniger behindert.

### Schlussfolgerungen

Die Entscheidung der SBB bezüglich des Bauvorgangs für die Limmatunterquerung der S-Bahn fiel auf das Gefrierverfahren. Die gewählte Variante bringt aus hydraulischer Sicht sicher Vorteile mit sich, die in Modellversuchen klar zum Vorschein kamen. Dies zeigte sich besonders beim Kolkgeschehen, da die gewählte Bauweise kaum Materialbewegungen hervorruft. Auch die kürzere Bauzeit und weniger Einbauten im Fluss dürften beim Entscheid eine Rolle gespielt haben. Die Modellversuche zeigten einmal mehr, wie hilfreich ein physikalisches Modell auch bei einem Entscheidungsprozess sein kann.

Adresse der Verfasser: Dr. Karl Taus, dipl. Bauing., und André Chervet, dipl. Bauing. ETH, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich (VAW), 8092 Zürich, ETH-Zentrum.