

Zeitschrift: Schweizer Ingenieur und Architekt
Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band: 104 (1986)
Heft: 22

Artikel: Limmatunterquerung: bisherige Erfahrungen mit dem Gefrierverfahren
Autor: Egli, Rolf
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-76168>

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: 17.01.2026

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

bach, damit sie unter die projektierte und seither erstellte Tramschleife zu liegen komme.

Schlussbemerkung

Die Linienführung der S-Bahn scheint auch aus heutiger Sicht richtig gewählt

worden zu sein. Neubaustrecken im Agglomerationsgebiet müssen auf eine zweite Ebene ausweichen, die im Stadtgebiet praktisch nur unterirdisch liegen kann. Tunnels sollten aus wirtschaftlichen Gründen lang und tief sein, anderseits erfordert die Kundenfreundlichkeit Stationen möglichst an der Oberfläche. Dank steiler Rampen konnten die unvermeidlichen teuren

oberflächennahen Abschnitte kurz gehalten werden. Etwas unterbewertet wurden bei der Wahl der Linienführung die Probleme der provisorischen Bauzugänge (Schächte) für die innerstädtischen Tunnels.

Adresse des Verfassers: *P. Zuber*, dipl. Ing. ETH,
Projektleiter S-Bahn, SBB-Bauabteilung Kreis III,
8021 Zürich.

S-Bahn Zürich

Limmatunterquerung

Bisherige Erfahrungen mit dem Gefrierverfahren

Von Rolf Egli, Zürich

Die beiden Baulose 2.04 und 4.03 zwischen dem neuen Bahnhof Museumstrasse und der Stampfenbachstrasse werden aufgrund eines Sondervorschlages bergmännisch aus dem Schacht Limmat heraus erstellt. In geologisch wechselnden Verhältnissen wird dabei das Gefrierverfahren unter extremen Bedingungen eingesetzt. Die vorhandenen Grundwasserverhältnisse und die geringe Überlagerung zwischen dem Tunnelscheitel und der Flussohle verlangen zusätzliche, flankierende Baumassnahmen. Eine Serie von Messungen und Prüfverfahren sind für die Kontrolle der notwendigen Voraussetzungen und für die Überwachung der Bauwerkssicherheit während der Ausführung unerlässlich. Die Lokalisierung und nachfolgende Sanierung von geologisch bedingten Schwachstellen wird dargestellt. Der eigentliche Tunnelbau kann erst nach Erfüllung aller Randbedingungen erfolgen und bildet das letzte Glied einer langen Kette von Arbeiten.

Konzept

Die Unterfahrung der Limmat und des Neumühlequais erfolgen in Anbetracht verschiedener Vorteile bergmännisch, wobei das Gefrierverfahren zur Anwendung kommt [1], [2].

Durch die vom Bauherrn ausgewählte Kombilösung werden die beiden Bauteile 2.04 und 4.03 miteinander verknüpft. (Bild 1).

Kennzeichnend für diese Baustelle ist die Vielfalt der Baumethoden, die auf engstem Raum angewandt werden. Es

Bild 1. Situation Baulose 2.04 und 4.03

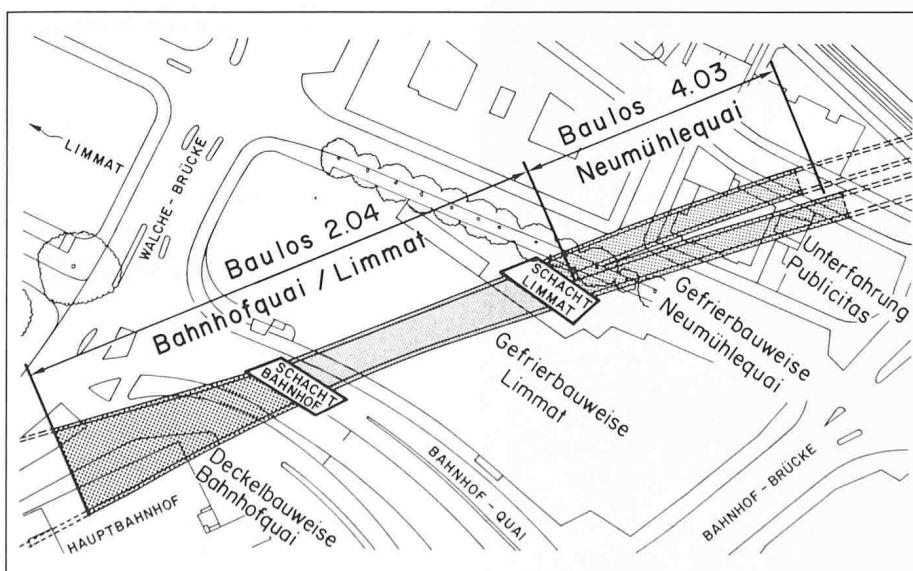
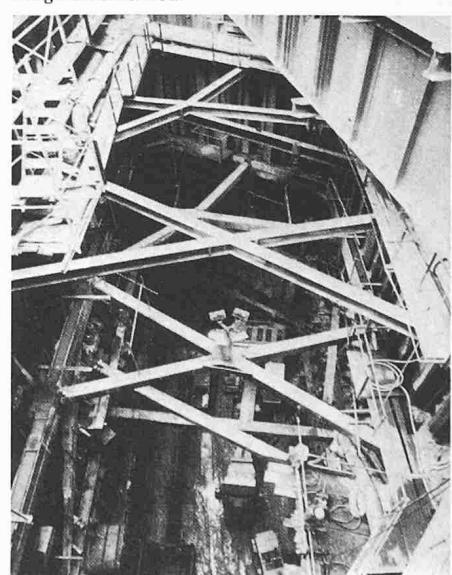


Bild 2. Schacht Limmat: Spriessung und Dienstbrücke; auf dem Schachtboden sind die drei Tunnelbaugeräte erkennbar



wird. Diese Lockergesteinszone wird mit der Belgischen Tunnelbaumethode durchtunnelt und der Tunnel bis zu einer genügenden Felsüberdeckung in die Molasse unter der Stampfenbachstrasse eingebunden.

Stand der Arbeiten

Die Bauarbeiten an den beiden Einzelröhren im Los 4.03 sind bereits weit fortgeschritten (Bild 3); die ersten beiden Gefrierabschnitte sind abgeschlossen, so dass erste Erfahrungen vorliegen.

Der Frostkörper für die Limmatunterquerung ist seit Februar 1986 aufgebaut; der Beginn der Vortriebsarbeiten hat sich verzögert, da Wasserzutritte festgestellt worden sind, die das Aufschneiden der Spundwand bis vor kurzem nicht erlaubt haben. Im Abschnitt «Gefrierarbeiten» wird näher darauf eingegangen.

Der vorliegende Beitrag basiert auf dem Bauzustand und Wissensstand von Ende März 1986; er beschränkt sich aus Platzgründen auf einige ausgewählte Aspekte und Probleme, mit denen die Baustelle im Zusammenhang mit dem Gefrierverfahren und dem Tunnelbau bisher konfrontiert worden ist.

Abdeckung der Limmatsohle

Eine Besonderheit stellt der Einbau einer thermischen Abdeckung auf der Limmatsohle dar. Der Gefrierkörper bildet sich als Folge der geringen Überdeckung (2,50 bis 3,50 m) bis unmittel-

bar unter die Flussohle, so dass das wärmere Limmatwasser übermäßig viel Kälte abführen kann. Der Gefahr einer Temperatur-Erosion des Frostkörpers wird durch den Einbau einer dämmenden Isolation begegnet. Welche Anforderungen werden an dieses System gestellt?

- Wärmeleitfähigkeit $k = 0.035 \text{ kcal/mh}^{\circ}\text{C}$
- Geringe Wasseraufnahme des Abdeckungsmaterials
- Minimale Bauhöhe, da die Schwellenhöhe für Einbauten begrenzt ist
- Kein grossflächiges Unterströmen durch das Flusswasser
- Sicherheit gegenüber Auftrieb, Hochwasser, Kolk oder mechanischer Beschädigung
- Verträglichkeit mit Limmat- und Grundwasser
- Möglichkeiten zur Überwachung und Kontrolle

Nach verschiedenen Vorversuchen wurde folgende Lösung (Bild 4) ausgeführt:

- Geschlossenzzellige PVC-Hartschaumplatten, die in 6 cm starke Platten geschnitten und teilweise beschichtet wurden. Die Platten sind mittels PVC-Scharnieren verbunden und können für die Verlegung zusammengefaltet werden (Bild 5).
- Auftriebssicherung mit VSL-Beschwerungsmatten ($d = 15 \text{ cm}$), die während dem Verlegevorgang kontinuierlich mit Colcrete-Mörtel verfüllt werden.
- Das ganze System wird mittels eines Kastens (Bild 5) verlegt, der unter der Überwachung von Tauchern über die Flussohle gezogen wird; die gefüll-

ten Beschwerungsmatten legen sich auf die aus dem Kasten gezogenen Isolationsplatten und verhindern damit das Aufschwimmen.

- Die Fugen zwischen den einzelnen Bahnen sowie alle Randabschlüsse müssen von Tauchern in Handarbeit eingepasst und beschwert werden.
- Der Hohlraum zwischen der gerüttelten Flussohle und der Abdeckung wird nachträglich mit Colcrete-Mörtel ausgegossen.

Die Temperaturen an der Flussohle werden durch ein System von Messkabeln überwacht, die in den Fugen eingelegt sind. Periodische Tauchgänge sowie Nivellements ausgesuchter Punkte vervollständigen das Überwachungssystem.

Der Verlegevorgang erfüllte die Erwartungen, wobei allerdings der Anteil an mühevoller Kleinarbeit für den Anschluss in den Randzonen überaus hoch war.

Da das System nicht wasserdicht ausgebildet ist, sind nachträgliche Reparaturen oder Perforationen möglich, ohne die Wirkung in Frage zu stellen.

Aufgrund der bisherigen Messungen kann ein grossflächiges Unterströmen der Abdeckung ausgeschlossen werden. Der Frostkörper ist im Limmatbereich weitgehend bis unter die Abdeckung gewachsen.

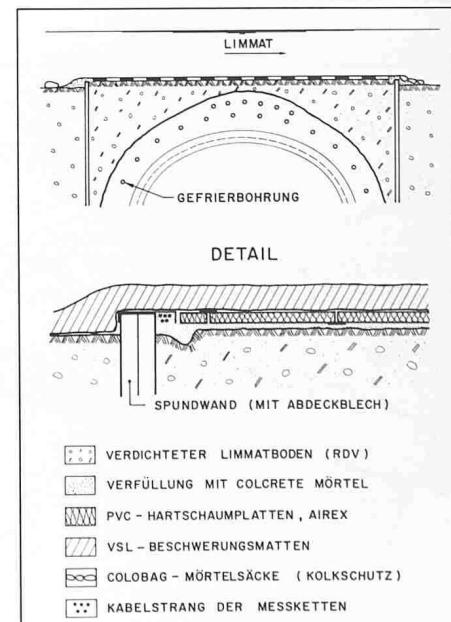
Die gemessenen Hebungen betragen max. 15 cm und haben zu klaffenden Fugen in den unarmierten Beschwerungsmatten geführt.

Das angewandte System hat sich bisher bewährt; die eigentliche Bewährungsprobe steht jedoch mit dem Anströmen wärmeren Limmatwassers noch bevor.

Bild 3. Unterfahrung Publicitasgebäude: Aushub im Schutz der auf Pfählen fundierten Bodenplatte; Blick Richtung Schacht Limmat, mit dem ausbetonierte Gefrierabschnitt der Axe 200



Bild 4. Abdeckung der Limmatsohle: Prinzipskizze mit Darstellung des Systems



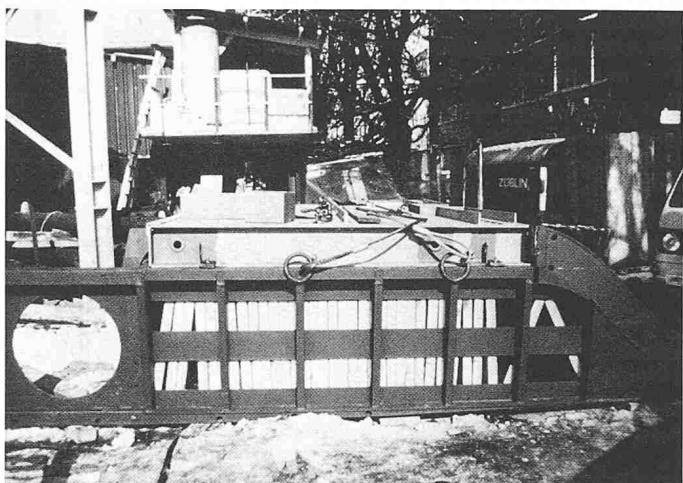


Bild 5. Verlegekasten mit abgepackter Isolation; der obere Kasten enthält die Beschwerungsmatten

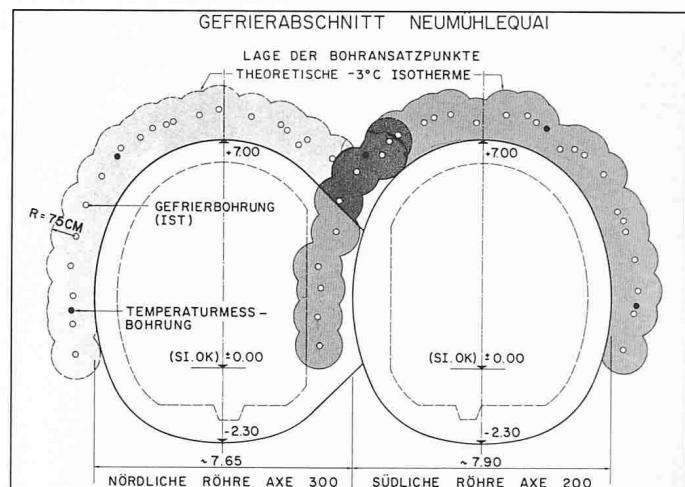


Bild 6. Tunnelprofile der Axen 200 und 300; Konzept der Gefrierkörper mit den Ansatzpunkten der Bohrungen

Gefrierarbeiten

Voraussetzungen für die Anwendung

Das Gefrierverfahren ist grundsätzlich in jedem Boden anwendbar ([3], [4]); die Grenzen sind jedoch in Relation zu den vorhandenen Randbedingungen zu setzen.

Beim vorliegenden Bauwerk bildet die Grundwasserströmung das Hauptkriterium für die Beurteilung. Eine maximale Fliessgeschwindigkeit von 2 m pro Tag (24 Std) ist als Grenzwert für den sicheren Aufbau eines Frostkörpers vorgegeben.

Weitere Anforderungen werden gestellt, wie

- Zielgenaues Bohren und Kontrolle der Bohrgenauigkeit;
- Eine Kälteanlage mit ausreichender Leistung und die systemgerechte Verteilung der erzeugten Kälte;
- Laufende Überwachung der Temperaturverhältnisse im Frostkörper;
- Verhinderung eines übermässigen Wachstums respektive Kälteabtrages des Frostkörpers.

Grundkonzept der Gefrierstrecken

In beiden Baulosen sind vier verschiedene Gefrierkörper aufzubauen (Tabelle 1).

Zwischen dem Schacht Limmat und der Schlitzwand an der Publicitas sind nacheinander beide Äste der Doppelröhre zu gefrieren; die Limmatunterquerung besteht dagegen aus zwei Gefrierabschnitten Ost und West, die aus den Schächten Limmat und Bahnhofquai heraus erstellt werden und einen zusammenhängenden Frostkörper bilden. Die Gefrierkörper sind überall bis in die dichte Grundmoräne eingebunden.

Die umfangreichen statischen und wärmetechnischen Berechnungen wurden

von Prof. Dr. H.L. Jessberger, Bochum, nach der Methode der Finiten Elemente durchgeführt.

Die Gefrierkörper sind mit einer Dicke von 1,50 m (Frostkörperrand: -3°C) berechnet, bei einer Kerntemperatur von -10°C . An den Tunnelbau stellt sich die Forderung, den Ringschluss innerhalb 8 m zu erstellen.

Gefrierabschnitt Neumühlequai

Während der Gefrierkörper das Profil der südlichen Röhre (Axe 200) bis in den Kämpferbereich umfasst, stützt sich der daneben liegende Frostkörper der Axe 300 in einer zweiten Phase auf den bereits ausbetonierten Tunnel der Axe 200 (Bild 6 und 7).

Die Strömungsgeschwindigkeit des Grundwassers unter der Quaimauer wurde mit einem Injektionsschirm über dem First reduziert. Injektionen während des Verpressens der Gefrierrohre ergänzten diese Bodenverbesserungsmassnahmen.

Gefrierabschnitt Limmat

Die geringe Überdeckung zwischen Tunnelgewölbe und Flussohle sowie

die vorhandenen Grundwasserverhältnisse bilden die grössten Hindernisse, die sich der Anwendung des Gefrierverfahrens entgegenstellten. Mit einer Reihe von zusätzlichen Massnahmen musste der Aufbau eines dichten und tragfähigen Frostkörpers sichergestellt werden. Vom projektierenden Ingenieur und der Unternehmung wurden verschiedene Varianten studiert und verglichen [1].

Die gewählte Lösung «TROG-RDV» ist im Bild 8 dargestellt. Eine zusätzliche Reihe von Gefrierbohrungen im First sowie Injektionen beim Rückzug der Verrohrungen ergänzen diese Massnahmen.

Bauaufschliisse und Anpassung des Konzeptes

Die geologisch-geotechnischen Aufschlüsse und Probleme sind eingehend dargestellt worden [1].

Aus den Erfahrungen und Beobachtungen der bisherigen Arbeiten konnte zwischen beiden Schächten eine – nicht erwartete – Rinne parallel zur Limmat erkundet werden (Bild 9). Die Rinne ist mit moränenartigen Ablagerungen ge-

Tabelle 1. Approximative Zahlenangaben über den Umfang der Gefrierarbeiten

	Einheit	Axe 200	Axe 300	Limmat	Total
<i>Länge der Gefrierstrecken</i>	Tm	33,5	33,5	77	144
<i>Gefrierbohrungen</i>	Stk	23	16	55+51	145
Anzahl	m'	810	560	3980	5 350
Bohrmeter	m ²	730	570	5800	7 100
<i>Gefrierkörper</i>					
Umhüllte Fläche	m ³	1100	850	7000	8 950
Vereisungsvolumen (theoretisch mit d = 1,50 m)	m ³	1100	850	8750	10 700
- ursprüngliche Grösse					
- mit Tieferlegung	m ³				
<i>Zum Vergleich</i>					
Borntunnel	m ³				3 700
Milchbucktunnel	m ³				18 900

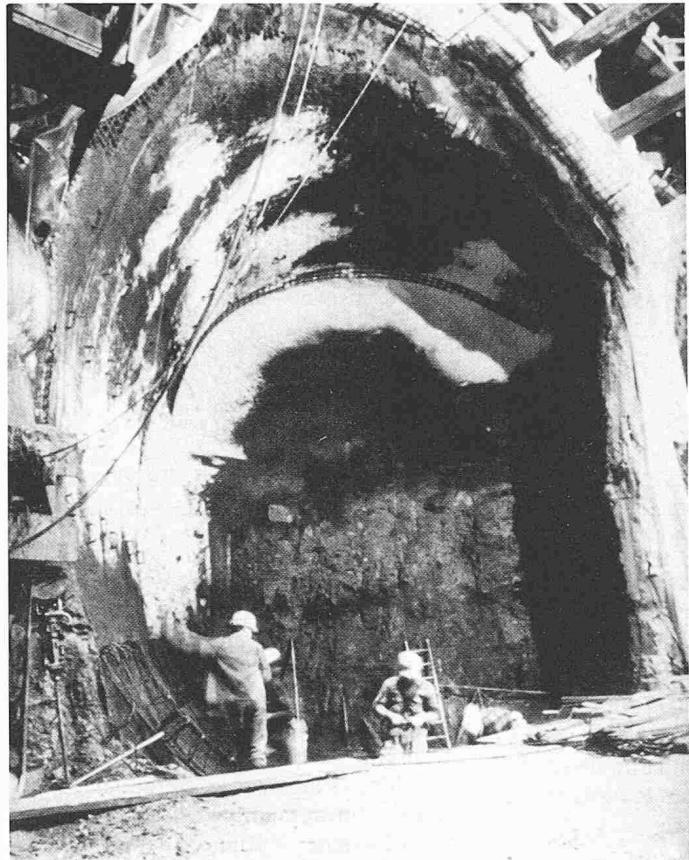


Bild 7. Ausbruch Gefrierstrecke Axe 300: Der Frostkörper stützt sich auf der rechten Seite auf das betonierte Gewölbe der Nachbarhöhre; der Spritzbeton ist bereits mit Eis überdeckt; Arbeiten für die 1. Etappe des Sohlgewölbes

füllt. Bei diesen – sehr blockreichen und stark durchlässigen – Schichten handelt es sich um heterogene, randglaziäre Ablagerungen.

Die harte und dichte Grundmoräne wurde dadurch wesentlich tiefer als prognostiziert aufgeschlossen; stellenweise fehlt sie sogar gänzlich. Man stand damit einer gegenüber den ursprünglichen Annahmen grundlegend veränderten Situation gegenüber.

Seitliche Wassereintritte unter dem Gefrierkörper hindurch mussten erwartet werden; mit der bisher vorgesehenen

Ausbildung der Frostkörper war das Einbinden in die Grundmoräne nicht mehr gegeben. Diesem Umstand wurde durch zusätzliche Gefrierbohrungen Rechnung getragen, welche fächerförmig bis in die Molasse hinunter reichen. Die Vergrösserung der Frostkörper ist erheblich, wuchs doch das zu vereisende Bodenvolumen um etwa 25%.

Bohrarbeiten

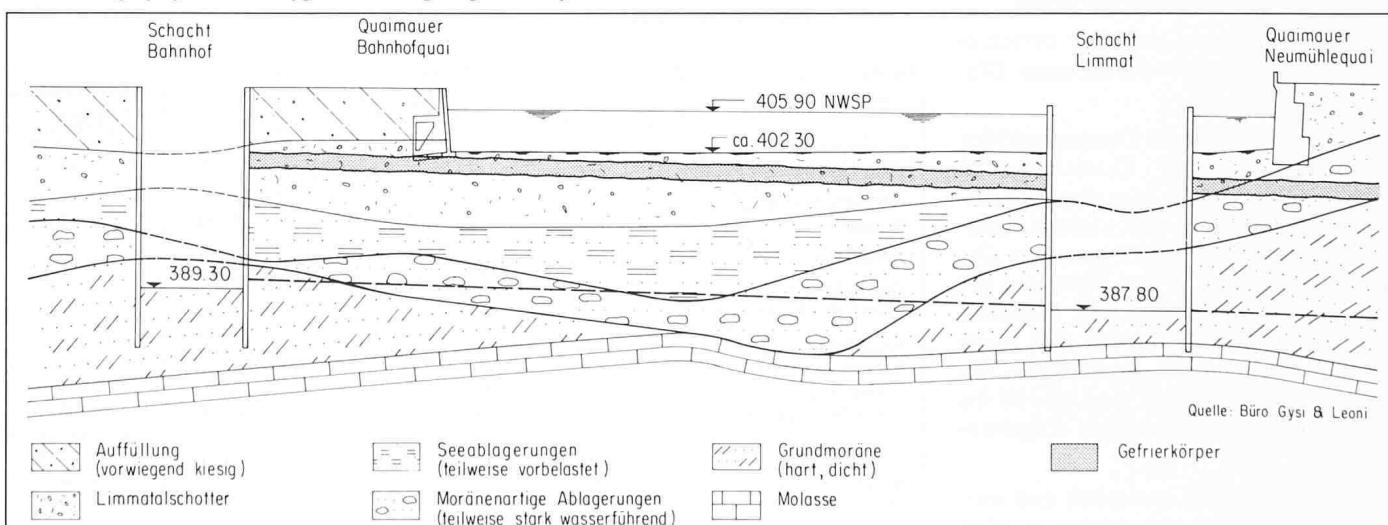
Das Bohrverfahren musste den schwierigen, wechselhaften Bodenverhältnissen und dem unter Druck stehenden

Grundwasser Rechnung tragen [1]. Beim angewandten «Doppelkopf-Überlagerungsbohrverfahren» verbleibt die Bohrkrone beim Rückzug der Bohrrohre im Boden und verhindert Ausschwemmungen des Bodens.

Fehlbohrungen liessen sich trotz sorgfältiger Ausführung nicht vermeiden (Bild 10).

Die geforderte Genauigkeit der etwa 40 m langen Bohrungen beträgt 1% der Bohrlänge; für die Beurteilung des ganzen Systems ist jedoch die gegenseitige

Bild 9. Längenprofil mit dem aufgeschlossenen geologischen Aufbau



Lage der Gefrierrohre entscheidender als die absolute Abweichung der einzelnen Bohrungen.

Aufbau und Betrieb der Gefrierkörper

Der Aufbau beider Gefrierkörper unter der Limmat muss aufgrund der geringen Überlagerung und der damit verbundenen Gefahr eines übermässigen Kälteabtrages in der kalten Jahreszeit erfolgen.

Die wärmetechnischen Berechnungen wurden im Laufe der Bauzeit verschiedentlich den eingetretenen Änderungen in der Grösse der Gefrierkörper sowie im Bauablauf angepasst; gleichzeitig konnten neuere Aufschlüsse (z. B. Ist-Lage der Gefrierbohrungen) mitberücksichtigt werden (Bild 11).

Grundsätzlich kann festgestellt werden, dass die errechneten Gefrierzeiten für die Dichtigkeit und Tragfähigkeit der Frostkörper sehr gut mit den erreichten Werten übereinstimmen, sofern die zulässigen Strömungsgeschwindigkeiten nicht überschritten worden sind.

Nachdem die Tragfähigkeit erreicht ist, wird der Gefrierkörper im intermittierenden Kühlbetrieb erhalten, um ein unnötiges Anwachsen des Frostkörpers zu vermeiden. Die Länge der Einschaltphasen ergibt sich dabei aus der Beurteilung ausgesuchter Temperaturmessgeber.

Überwachung der Frostkörper und der Kälteanlage

Die ordnungsgemässe Funktion der Kälteanlage, des Kältetransportes und die Temperaturen im Untergrund müssen ständig überwacht werden. Folgende Methoden werden dabei angewandt.

- Longitudinale und horizontale Temperaturmessbohrungen,
- Messketten auf der Limmatsohle,
- Bewegliche Messketten, die in die Gefrierrohre eingeführt werden können,
- Geodätische Kontrollen,
- Messung von Temperaturen, Drücken und Durchflüssen im Rohrleitungssystem und an der Kälteanlage,
- Durchgehende Überwachung durch einen Geräteführer.

Eine automatische Messanlage erfassst und registriert die Temperaturen der etwa 350 Messgeber zyklisch.

Feststellen von Unregelmässigkeiten

Für die Beurteilung der Gefrierkörper sind die Temperaturmessungen massgebend. Sie geben Aufschluss darüber, ob der Frostkörper geschlossen ist und die erforderliche Stärke erreicht hat. Abweichungen einzelner Geber in der

Temperaturrentwicklung lassen in der Regel auf Unregelmässigkeiten im Frostkörper, bzw. Untergrund schliessen.

Erste Hinweise auf Fehlerstellen können hier gewonnen werden und ermöglichen eine Nachprüfung.

Vor dem Anschneiden der Spundwand wird der Tunnelkörper mit Drainagebohrungen entwässert. Damit ergibt sich zugleich eine weitere Möglichkeit zur Kontrolle der Dichtigkeit.

Nimmt die anfallende Wassermenge im Verlauf der Zeit nicht genügend ab, lässt sich wiederum auf Fenster und Schwachstellen schliessen. Periodische Messungen der Wassermengen und -temperaturen sowie Druckmessungen und chemische Analysen des Wassers geben weitere Hinweise. Nachdem Anzeichen für ungefrorene Stellen und Fenster vorliegen, müssen diese Zonen eingegrenzt und lokalisiert werden.

Mit zusätzlichen, temporären Temperaturmessungen in den Gefrierrohren kann durch die schnelle Erwärmung einzelner Messgeber auf Störzonen geschlossen werden.

Gezielte Impfversuche mit verschiedenen Färbmitteln geben Auskunft über noch vorhandene Wasserläufe sowie die Strömungsrichtungen. Mit diesen Methoden hat man Unregelmässigkeiten in den Gefrierkörpern Neumühlequai mit ausreichender Genauigkeit orten können.

Die Ursachen lagen hier in den viel zu hohen Fließgeschwindigkeiten (16 bis 24 m pro Stunde!), die in unbehandelten, heterogenen und stark durchlässigen Bodenschichten auftraten; der Frostkörper konnte sich dadurch an einzelnen Stellen gar nicht aufbauen.

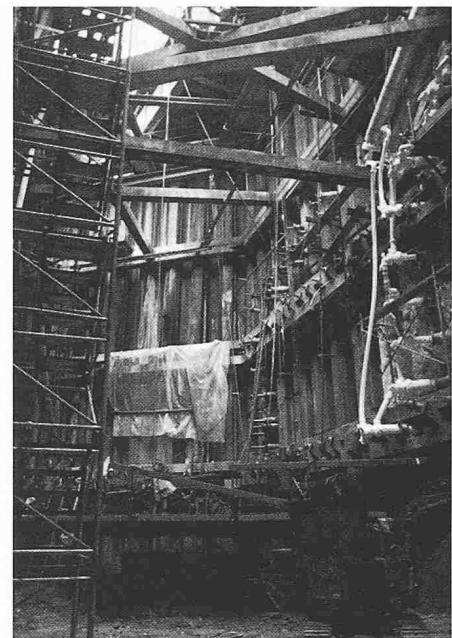


Bild 10. Schacht Limmat: Doppellongarinen mit Ankerköpfen; Gefrierrohre Axe 200 mit beginnender Vereisung

Bild 11. Zeitliche Entwicklung der Gefrierkörperdicke ($T = -3^{\circ}\text{C}$) im Kämpferbereich gemäss Berechnung

(Quelle: Bericht Prof. Dr. H. L. Jessberger)

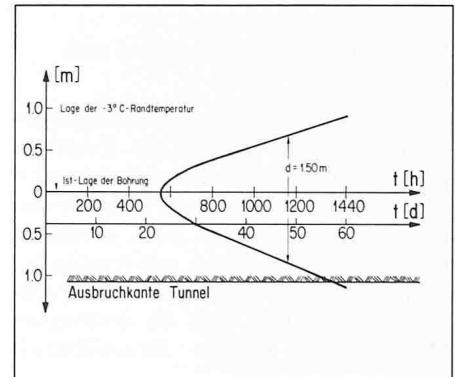
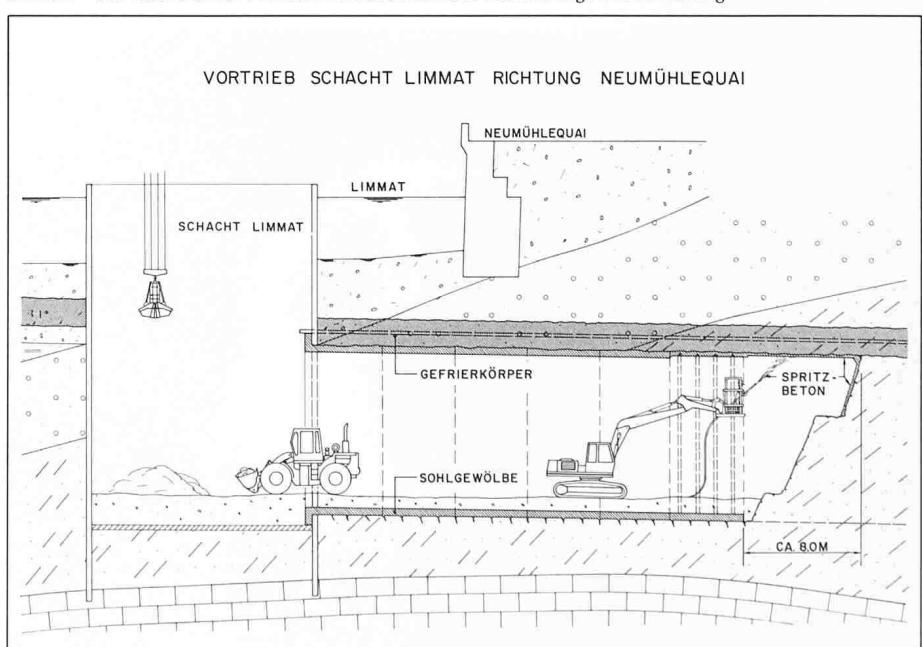


Bild 12. Betriebsweise der Tunnelbauarbeiten: Phase Felssicherung mit Schutterung



Die Temperaturentwicklung beim Aufbau der Frostkörper unter der Limmat signalisierte dagegen eine völlig normale Entwicklung; Hinweise auf mögliche Schwachstellen liessen sich nicht erkennen.

Erst die Drainagebohrungen haben gezeigt, dass Fenster in einem Bereich vorhanden sein müssen, der nicht durch Temperaturmessungen abgedeckt ist.

Die bisher georteten Schwachstellen liegen nach den heutigen Erkenntnissen hauptsächlich in den bereits erwähnten, moränenartigen Ablagerungen («Blockteppich»), die durch die seinerzeitigen Sondierbohrungen nicht erfasst worden sind; hier ist der vorgegebene Grenzwert der Durchlässigkeit von 2 m pro 24 h als Kriterium für die Anwendbarkeit des Gefrierverfahrens deutlich überschritten.

Für die Lokalisierung dieser Zonen wurden zusätzlich Ultraschallmessungen durch die Firma Interfels durchgeführt. Durch die unterschiedliche Ausbreitungsgeschwindigkeit (Wasser etwa 1500 m/s; Eis etwa 3600 m/s) der Ultraschallwellen können Fehlstellen und Unregelmässigkeiten zwischen benachbarten Gefrierrohren erkannt werden.

Sanierung von Schwachstellen und Lecks

Alle noch vorhandenen Grundwasserströmungen im Bereich der Frostkörper müssen auf ein Mass reduziert werden, welches erlaubt, dass sich der Gefrierkörper schliessen und aufbauen kann; erst dann ist die notwendige Sicherheit für den Beginn der Ausbrucharbeiten gegeben. Die zu treffenden Massnahmen hängen hauptsächlich

vom Ort (und damit auch der Zugänglichkeit) sowie der Grösse der Leckstellen ab. Als wirksamste und schnellste Massnahme werden Injektionen angewandt. Gezielte horizontale oder vertikale Bohrungen in die kritischen Zonen erlauben das Einpressen von Injektionsgut über Manschettenrohre. Als Injektionsgut werden verschiedene Mischungen mit unterschiedlicher Konsistenz eingesetzt. Neben den bekannten Zement-Bentonitmischungen haben sich Injektionen mit Kunstharz (Wilkit) sehr gut bewährt. Eine weitere Möglichkeit zum Schliessen von Fenstern ist das sogenannte «Intensiv»-Gefrieren; während eines vorgegebenen Zeitraumes werden einzelne Teile des Frostkörpers mit der ganzen Kälteleistung beaufschlagt, während die übrigen Stränge abgeschaltet werden. Dadurch werden sehr rasch Vorlauftemperaturen um -40°C erreicht. Diese Massnahme hat jedoch nur eine beschränkte Wirkung.

Die Erfahrungen mit der Sanierung von Fenstern beim vorliegenden Objekt sind neuesten Datums und daher noch nicht abschliessend ausgewertet.

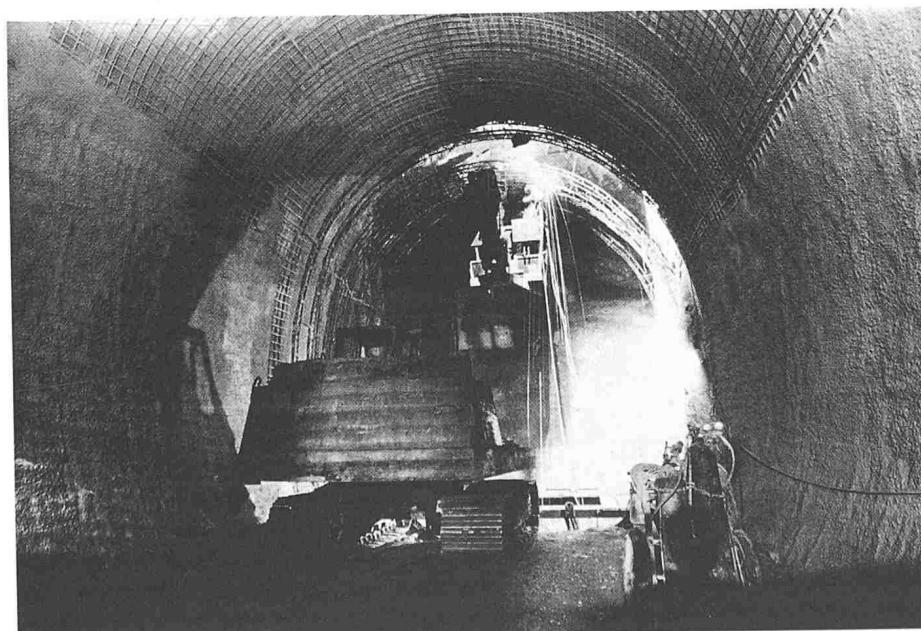
Im Limmatbereich stehen diese Arbeiten kurz vor dem Abschluss.

Tunnelbau

Die Ausbruch- und Sicherungsarbeiten bilden das letzte Glied in einer langen Kette von Arbeiten; sie können jedoch erst in Angriff genommen werden, wenn alle Vorbedingungen lückenlos erfüllt worden sind.

Erfahrungen liegen bisher vom Ausbruch der beiden Röhren unter dem Neumühlequai vor.

Bild 13. Versetzen der Gitterträger im Gefrierabschnitt Neumühlequai



Der Beschrieb der Arbeiten kann kurz gehalten werden, da herkömmliche und bekannte Verfahren angewandt werden (Bild 12).

Der Vortrieb Kalotte-Strosse erfolgt in Etappenlängen von etwa 1,50 m; jeweils nach 8 m wird das Sohlgewölbe betoniert und der Ring mittels Pantex-Gitterbogen und Spritzbeton geschlossen (Bild 13).

Im Kalottenbereich wird sofort nach dem Schrämen ein Brustverzug zusammen mit der ersten Spritzbetonlage aufgebracht.

Im Querschnitt kann die Bauweise sehr flexibel an die angetroffenen Verhältnisse angepasst werden.

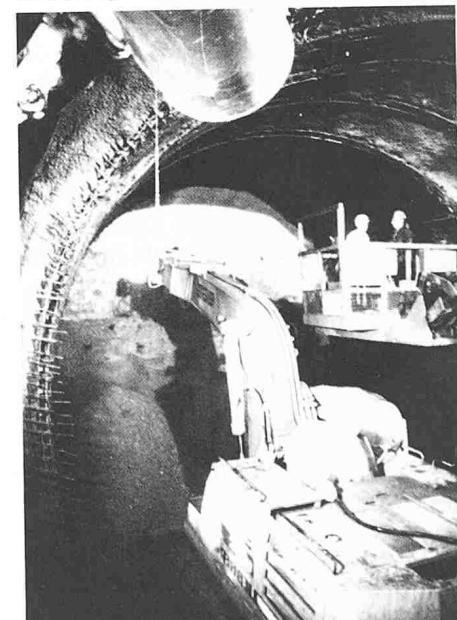
Die Platzverhältnisse im Schacht und in den schmalen Einspurröhren sind knapp und erlauben keine nebeneinander laufenden Tätigkeiten. Der Ausbruch erfolgt mit einem Teilschnittkopf, der auf einem Raupenbagger aufgebaut ist (Bild 14).

Ein weiterer Raupenbagger wird für die Felssicherungsarbeiten eingesetzt; wechselweise können eine Arbeitsbühne, ein hydraulischer Abbaumesser, ein Reisszahn oder ein Schwenklöffel montiert werden. Die Schutterung erfolgt durch einen Pneulader von der Ortsbrust bis in den Schacht, von wo das Material mit einem Greifer und Kran in das Aushubsilo gefördert wird.

Das Konzept hat sich in den gegebenen Verhältnissen sehr gut bewährt, wobei die Schrämelistungen in diesem heterogenen Baugrund sehr stark variieren.

Die zahlreichen Findlinge in allen Grössen sowie der gefrorene Boden vermindern die Schrämelistung und erhöhen den Meisselverschleiss. Der Ein-

Bild 14. Ausbrucharbeiten mit dem Schrämbagger in den Einspurröhren



fluss des gefrorenen Bodenmaterials zeigte sich besonders eindrücklich in der Axe 200, wo die Kalotte als Folge der mehrwöchigen Sanierungsarbeiten (mit Durchlauf-Gefrierbetrieb) vollständig gefroren war.

In den vorliegenden Verhältnissen konnten etwa 5-6 m Tunnelvortrieb pro Woche im Regelvortrieb der Gefrierstrecke erzielt werden. Die Aufstückelung der Anschnittphase mit dem aufgefächerten Teil und die ständig wechselnden Arbeitsabläufe auf einer kurzen Strecke relativieren jedoch den Aussagewert solcher Zahlen.

Das Erhalten der Gefrierkörper während den Ausbrucharbeiten bot keine grösseren Probleme.

Die Temperaturen konnten durch einen gezielten Kühlbetrieb und mit genügender Reserveleistung des Kälteaggregates jederzeit im Griff gehalten werden. Die im jeweiligen Vortriebsbereich liegenden Messgeber erwärmen sich beim Auffahren des Tunnels um durchschnittlich etwa 3° bis 5°C; sowohl sommerliche Temperaturen als auch der Wärmeeintrag durch die Vortriebsarbeiten konnten aber durch ein angepasstes Betriebsprogramm ausgeglichen werden.

Schlussbemerkungen

Die Anwendung des Gefrierverfahrens bietet im vorliegenden Fall verschiedene Vorteile; in Kombination mit anderen Bauverfahren bildet diese Methode oftmals erst die Voraussetzung für die sichere Ausführung eines Bauvorhabens.

Die im Zusammenhang mit der Gefrierbauweise zu lösenden Probleme sind jedoch nur Teil eines Aufgabenkataloges, wie er in der bisher erlebten Intensität für eine einzige Baustelle wohl eher selten ist.

Die mannigfaltigen Aufgaben, die unter erheblichem Zeitdruck zu lösen sind, stellen für alle Beteiligten in Planung und Ausführung eine grosse Herausforderung dar, die nur durch Zusammenarbeit und Engagement bei der ingenieurmässigen Bearbeitung bewältigt werden kann.

Adresse des Verfassers: *R. Egli, dipl. Ing. ETH, Locher & Cie AG, Bauingenieure und Bauunternehmer, Pelikanplatz 5, 8022 Zürich,*

SBB – Zürcher S-Bahn, Limmatquerung

Projektleitung:

SBB, Bauabteilung Kreis III, Zürich

Projekt und Bauleitung Unterfahrung

Neumühlequai:

Elektrowatt Ing. Unternehmung AG, Zürich

Projekt und Bauleitung Limmatunterquerung:

Basler & Hofmann, Ing. und Planer AG,

Zürich

Arbeitsgemeinschaft Limmatquerung:

Locher & Cie AG, Zürich

Ed. Züblin & Cie AG, Zürich

Walo Bertschinger AG, Zürich

Schafir & Mugglin AG, Zürich

Gefrierarbeiten für die Arbeitsgemeinschaft:

Philip Holzmann AG, D-7800 Freiburg

Geotechnisch-geologische Beratung der

Arbeitsgemeinschaft:

Gysi & Leoni, Ingenieurbüro für Geotechnik + Geologie, Zürich

Literaturverzeichnis

- [1] *Gysi H.: Limmatunterquerung im Gefrierverfahren; Geotechnische Probleme; SIA-Dokumentation 94, Referate der SIA-Studientagung vom 27. September 1985*
- [2] *Gründler H.; Hagmann A.J.: Bahnhof Museumstrasse und Unterquerung der Limmat; SIA-Dokumentation 94*
- [3] *Jessberger H.L.: Theorie und Anwendungsgrenzen des Gefrierverfahrens im Bauwesen; SIA-Dokumentation 32, Referate der Studientagung vom 30./31. März 1979*
- [4] *Jonuscheit P.-G.: Anwendung des Gefrierverfahrens im Tunnel- und Stollenbau; SIA-Dokumentation 32*

S-Bahn Zürich

Unterfahrung Rämihäuser:

Projektvorstellung und die Erfahrung des Arbeitsablaufes bis heute

Von Walter Spaltenstein, Zürich

Das Baulos 4.07 Unterfahrung Häuser Rämistrasse gehört zur Teilstrecke 4, Hirschengrabentunnel. Die westliche Begrenzung des vorzustellenden Bauloses ist das Baulos 4.05 Hirschengrabentunnel, Abschnitt Seilergraben, die östliche Begrenzung ist das Baulos 4.08 Tunnel Rämistrasse. Das relativ kurze Teilstück 4.07, von 23 m, verlangt eine besonders schonende Bauweise, da die zu unterfahrenden Häuser nur sehr kleine Abstände von der Oberkante des Tunnelbauwerkes bis zu den Kellern und Fundamenten aufweisen. Ein weiteres nicht zu unterschätzendes Problem bilden die rückseitigen Wände der Häuser an der Rämistrasse. Diese Wände sind als 20 m hohe Bogenstützmauern ausgebildet, so dass das angrenzende höher liegende Gelände abgestützt wird. Die resultierenden Horizontalkräfte, die auf diese Stützmauern wirken, müssen in jeder Bauphase sicher übernommen werden.

Submissionsvorgeschichte

Neben der in der Einleitung geschilderten minimalen Unterfahrungshöhe von 1 bis 2 m, die eine übliche Untertunne-

lung nicht zulässt, bestehen weitere zu berücksichtigende Randbedingungen wie die Erhaltung der unter Denkmalschutz stehenden Häuserfassaden an der Rämistrasse, das Aufrechterhalten des 2spurigen öffentlichen und priva-

ten Verkehrs ohne störende Behinderungen. Während der ganzen Bauzeit ist der Fussgängerverkehr durch die Baustelle zu gewährleisten. Technisch musste also eine Lösung gesucht werden, die alle genannten Bedingungen erfüllt. Die nicht unproblematischen geologischen Verhältnisse mussten ebenfalls entsprechend berücksichtigt werden.

Die Schweizerischen Bundesbahnen, vertreten durch die Elektrowatt Ingenieurunternehmung AG, haben in einem 2stufigen Verfahren eine beschränkte Anzahl Unternehmungen eingeladen, entsprechende Lösungen vorzuschlagen, damit dieses Baulos sicher und möglichst wirtschaftlich erstellt werden kann. Die Vorabklärungen der Unternehmer mit den von ihnen selbst zugezogenen Ingenieurbüros, diente vor allem dem Studium von ausführbaren Unterfangungsmethoden. Die eingereichten Lösungs-Vorschläge sahen durchwegs Unterfan-