Anwendung des Gefrierverfahrens im Tunnelbau

Autor(en): **Könz, Peider / Garbe, Lothar / Aerni, Kurt**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizerische Bauzeitung**

Band (Jahr): **96 (1978)**

Heft 8

PDF erstellt am: **24.04.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-73632

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

HERAUSGEGEBEN VON DER VERLAGS-AKTIENGESELLSCHAFT DER AKADEMISCHEN TECHNISCHEN VEREINE, 8021 ZÜRICH, POSTFACH 630

Anwendung des Gefrierverfahrens im Tunnelbau

Von **Peider Könz, Lothar Garbe** und **Kurt Aerni**, Zürich

Der Ausbruch von Tunneln in Lockermaterial ist im allgemeinen ein kostspieliges Unterfangen und stellt in technischer Hinsicht hohe Anforderungen. Bei der Unterfahrung von dicht bebauten Gebieten im innerstädtischen Bereich gilt es hauptsächlich Setzungen zu vermeiden. Im Zusammenhang mit der Durchtunnelung nicht stabiler Hänge oder wassergesättigter Zonen stellen sich Stabilitäts- und Dichtigkeitsprobleme.

Zur Bewältigung solcher Aufgaben werden Spezialmethoden (z.B. Schildverfahren, Konsolidationsinjektionen mit Zement oder mit chemischen Mitteln) verwendet. In neuester Zeit gelangt bei solchen Verhältnissen immer öfter das Gefrierverfahren zur Anwendung.

Dieses Verfahren wurde ursprünglich im Bergbau eingeführt und galt bisher als kostspielig und technisch kompliziert. In den letzten Jahren ist jedoch die entsprechende Verfahrenstechnik stark verbessert worden. Dazu sind auch die Kenntnisse über das Verhalten von gefrorenem Boden soweit ergänzt und abgerundet worden, dass die Anwendung des Gefrierverfahrens heute im Grosstunnelbau in besonders schwierigen Baugrund-Verhältnissen durchaus Vorteile gegenüber vergleichbaren herkömmlichen Methoden bieten kann.

Im vorliegenden Artikel werden zuerst die wichtigsten Grundsätze des Gefrierverfahrens erläutert und anschliessend wird die Anwendung des Verfahrens an drei aktuellen Beispielen beschrieben.

Grundsätzliches

Das Prinzip des Gefrierverfahrens besteht darin, über dem auszubrechenden Tunnel ein *Traggewölbe aus gefrorenem Boden* zu schaffen. Durch *Gefrierrohre*, die entweder von der Bodenoberfläche aus in *fächerförmig um den Tunnelquerschnitt* angeordneten Bohrungen verlegt werden oder *zylindrisch längs dem Tunnel* angeordnet werden, wird in einem *geschlossenen Kreislauf* eine auf —20 °C bis —40 °C *gekühlte Sole* geleitet.

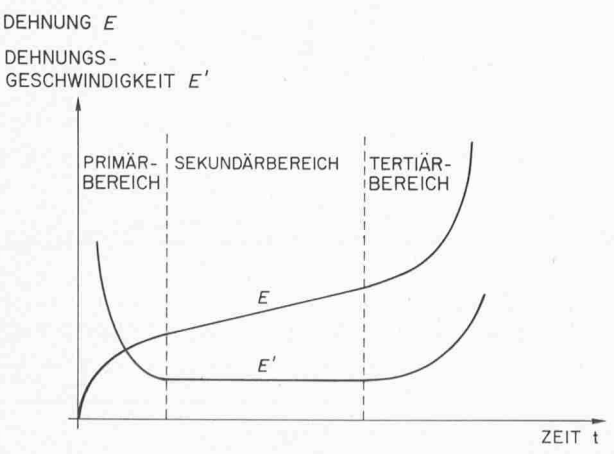


Bild 1. Typische Kriechkurve von gefrorenem Boden (Temperatur T = konst., Spannung σ = konst.)

Dadurch wird das im Boden vorhandene Wasser gefroren. Das Gewölbe aus gefrorenem Boden muss so bemessen werden, dass es während der Ausbrucharbeiten des Tunnels alle äusseren Belastungen aufnehmen kann, bis das Traggewölbe aus Beton oder Spritzbeton eingebracht ist.

Da der gefrorene Boden *statische* Aufgaben zu erfüllen hat, sind seine Eigenschaften genau abzuklären. Massgebend für sein Verhalten sind nicht nur *Kornaufbau, Lagerungsart* und *Wassergehalt*, sondern vor allem auch die *Gefriertemperatur* sowie *Grösse* und *Dauer der Belastung*. Durch eingehende Vorversuche ist für den *Frostkörper* insbesondere das *zeit- und temperaturabhängige Spannungs-Verformungsverhalten* zu ermitteln.

Das zeitabhängige Materialverhalten von gefrorenem Boden kann durch eine Kriechkurve wiedergegeben werden (Bild 1). Sie kann entsprechend den Deformationsgeschwindigkeiten in folgende Bereiche eingeteilt werden:

- den Primärbereich mit abnehmender Deformationsgeschwindigkeit,
- den Sekundärbereich mit konstanter Deformationsgeschwindigkeit und
- den Tertiärbereich mit zunehmender Deformationsgeschwindigkeit.

In der Praxis muss die Bemessung des Frostkörpergewölbes so erfolgen, dass vor Ende des Sekundärbereichs der Kriechkurve das Traggewölbe aus Beton oder Spritzbeton eingebaut ist und dass bis zu diesem Zeitpunkt die effektiven Deformationen des Frostkörpergewölbes ein zu definierendes, zulässiges Mass nicht überschritten haben.

Im weiteren sind die *Wasserverhältnisse im Baugrund* abzuklären. Ein Wassergehalt von 5 bis 7 Prozent bildet die untere Grenze für die Anwendung des Verfahrens. Strömendes Grundwasser kann je nach Wärmetransport durch das Wasser die Anwendung des Gefrierverfahrens gefährden. Dies ist der Fall, wenn die Wärmezufuhr durch das Grundwasser grösser ist als die Wärmeabfuhr durch die Gefrierrohre. In diesem Falle müssen besondere Massnahmen getroffen werden. Sie können darin bestehen, den Gefrierrohrabstand zu verkleinern, mehrere Reihen von Gefrierrohren anzuordnen oder die Gefriertemperatur durch Verwendung von *flüssigem Gas* zu erniedrigen. Eventuell besteht die Möglichkeit, den Boden zu dichten oder die Strömung durch Pumpen zu vermindern.

Bei der Ausführung der Bohrungen für das Verlegen der Gefrierrohre spielt die *Bohrgenauigkeit* eine entscheidende Rolle, da die Gefrierzeit bis zum Zusammenschluss benachbarter Frostzylinder etwa mit dem Quadrat des Gefrierrohrabstandes wächst. Die grösste zugelassene Abweichung der Bohrung von der Sollage beträgt 1 Prozent der Bohrlänge. Wird diese Genauigkeit nicht eingehalten, müssen zusätzliche Bohrungen ausgeführt werden oder die Gefrierzeit wird massgebend verlängert. Beides verteuert die Ausführung wesentlich.

Die Kontrolle der Ausdehnung des Frostkörpers und der Festigkeit des gefrorenen Bodens kann nur durch Temperaturmessungen vorgenommen werden. Zu diesem Zweck werden zwischen den Gefrierrohren an typischen Stellen Bohrungen vorgesehen, in die Temperaturfühler versetzt werden. Aufgrund der Temperaturmessungen und der Labortests kann die Festigkeit des gefrorenen Bodens ermittelt werden.

Der Born-Eisenbahntunnel zwischen Olten und Rothrist

Allgemeines

Der doppelspurige, 810 m lange Borntunnel ist Bestandteil der neuen, etwa 6 km langen SBB-Linie, die zwischen Olten und Rothrist am *linken Aareufer* erstellt wird. Der Ausbruchquerschnitt des Tunnels beträgt 85 m². Die Eröffnung der Linie ist für das Jahr 1981 vorgesehen (Bild 2).

Geologie

Der Tunnel durchfährt gegenüber von *Aarburg* von Norden nach Süden einen Ausläufer des Born, dieser Bergzug ist die letzte vor dem Mittelland liegende Aufwölbung des Faltenjura. In den *Portalzonen* sind *Lockergesteinsmassen* zu durchqueren, die durch Steinschläge und Rutschungen entstanden sind und aus *tonigem Silt mit eingelagerten Kalkblöcken* aller Grössen bestehen. Der Gehängeschutt, der das Gebiet des Tunnels 10–30 m mächtig überlagert, neigt zum *Kriechen* (Bild 3).

Projekt

Wegen des spitzwinkligen Eintrittes des Trassees in den Hang am Nordportal ergibt sich dort ein 250 m langer und bis zu 13,0 m tiefer Voreinschnitt, der mit einer Bohrpfahlwand gesichert ist. Auf eine 30 m lange Tagbaustrecke folgt eine bergmännische Strecke von 745 m, wovon 75 m im Lockergestein liegen. Dieses Teilstück wurde im Gefrierverfahren erstellt.

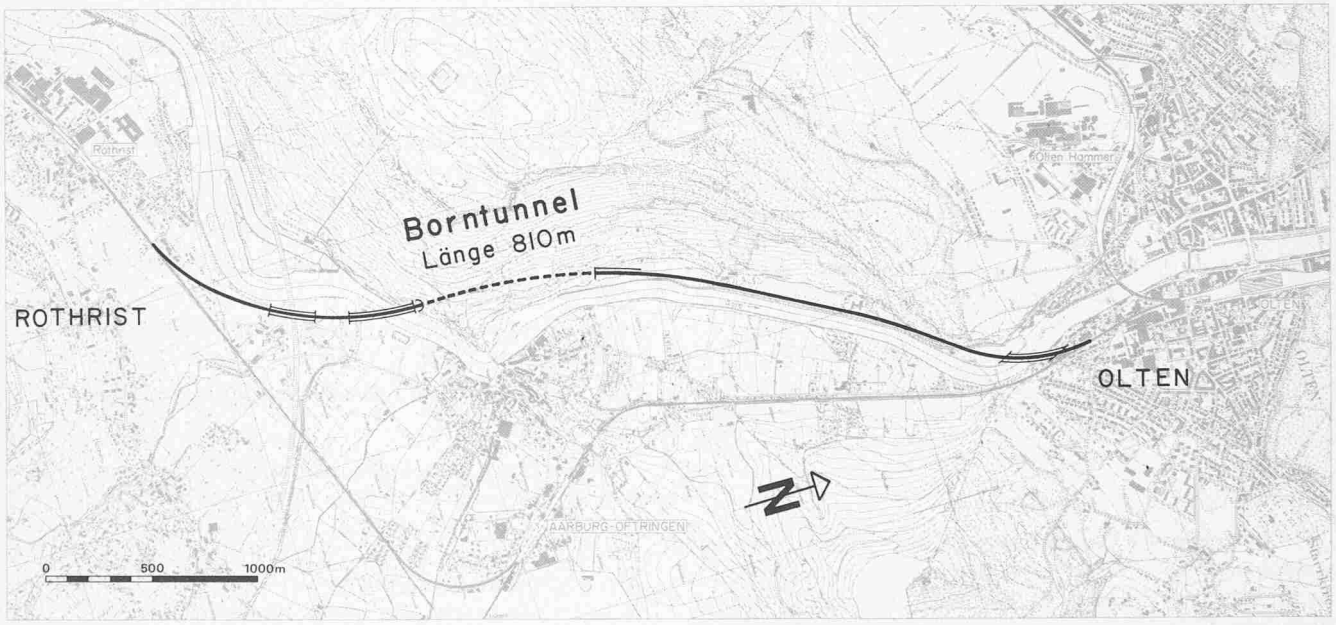


Bild 2. Situation der neuen SBB-Linie Olten–Rothrist mit Borntunnel

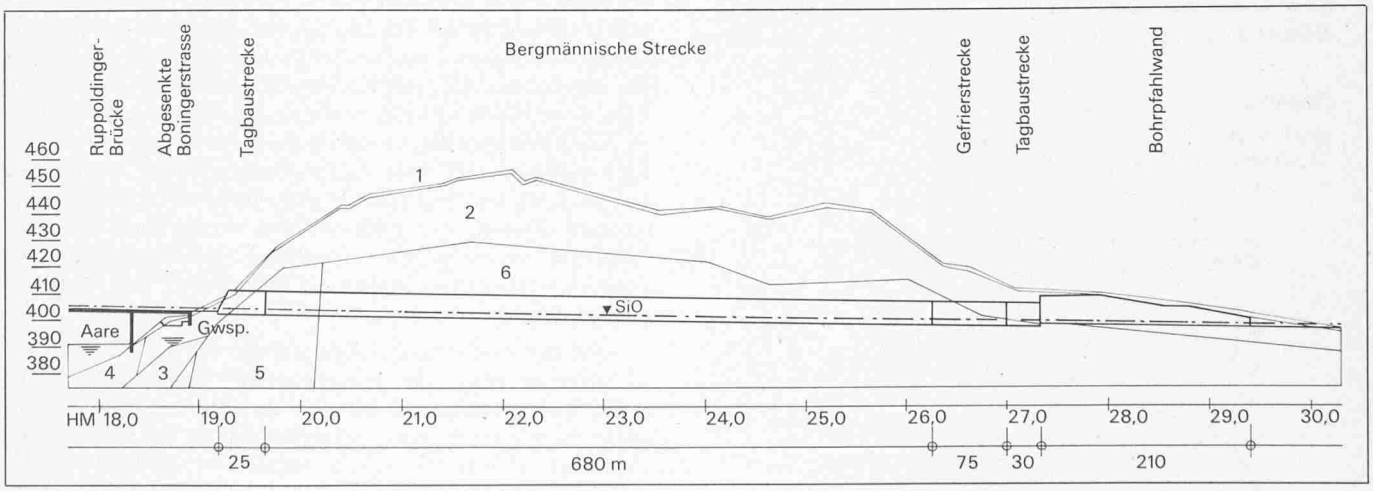
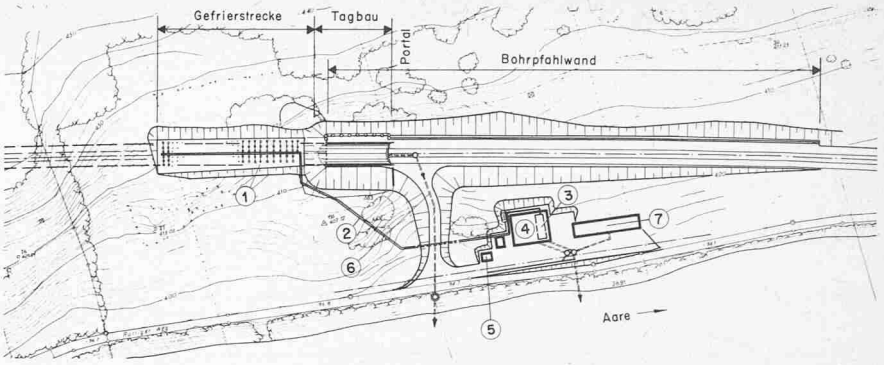


Bild 3. Längenprofil
1 Deckschicht (Humus, künstliche Auffüllung)
2 Gehängeschutt (toniger Silt, toniger Sand toniger Kies, Kalkblöcke)
3 Seeablagerung (toniger Silt, Silt, Feinsand)
4 Flussablagerung (Sand, Kies, zum Teil siltig)
5 Sequankalk (Jura, oberer Malm)
6 Effinger Mergel (Jura, unterer Malm)

Bild 4. Situation Voreinschnitt Nord mit Gefrierstrecke

1 Gefrierrohrquerschnitte und Verteilleitungen
2 Hauptleitungen für Vor- und Rücklauf der Sole
3 Gefrieranlage
4 Werkstatt
5 Trafo
6 prov. Baustellenzufahrt
7 Baubüros



Die Entscheidung für die *erstmalige Anwendung des Gefrierverfahrens in der Schweiz* im Zusammenhang mit dem Bau eines Verkehrstunnels wurde nach eingehender Prüfung der Vor- und Nachteile verschiedener Sonderbaumethoden getroffen. Ausschlaggebend war vor allem das *geringste Baurisiko* dieser Methode, die praktisch *keine Störung des heiklen Kriechhanges* verursacht. Zusätzlich ergab sich eine *Verkürzung des Bauprogramms*. Finanziell war die Methode den anderen untersuchten Sonderbaumethoden gleichwertig.

Festlegung des Gefrierkonzeptes

Bevor das Ausführungskonzept des Gefrierverfahrens definitiv ausgearbeitet werden konnte, mussten zwei Entscheidungen gefällt werden, die grossen Einfluss auf die Gestaltung vieler Einzelheiten haben:

- Anordnung der Gefrierrohre,
- Ausbildung des definitiven Traggewölbes und der Ausbruchart.

Beim Borntunnel wurde wegen der *geringen Überlagerung* von nur 6–10 m, und da keine Überbauung vorhanden ist, beschlossen, die *Gefrierbohrungen vom Gelände oberhalb des Tunnels* aus niederzubringen (Bild 8).

Die am Born gewählte Anordnung der Gefrierrohre bedingt kürzere Bohrungen, allerdings in grösserer Zahl als die Anordnung der Bohrungen parallel zum Tunnel. Vor allem aber bietet sie bauprogrammliche Vorteile. Die Bohrarbeiten und sämtliche Installationsarbeiten am System der Gefrierrohre können unabhängig von Ausbruch und Verkleidung des Tunnels ausgeführt werden. So kann das Frostkörpergewölbe sukzessive, ohne Unterbrüche der Arbeiten im Tunnel zu verursachen, bereitgestellt werden, was bei der Anordnung der Rohre parallel zum Tunnel nicht der Fall ist.

Bei der Ausbildung des definitiven Traggewölbes mussten die schwierigen Hangverhältnisse berücksichtigt werden. Ein hoher Anteil des Kriechdruckes des Hanges wird nach Auftauen des Frostkörpers die Tunnelauskleidung belasten. Zur Aufnahme dieser Kräfte ist ein *armiertes Betontraggewölbe* von 75 cm Stärke notwendig.

Um das Frostkörpergewölbe möglichst rasch aufzugeben und das Betongewölbe rechtzeitig bereitstellen zu können, wurde folgendes *Vorgehen* gewählt:

- Bereitstellen des Frostkörpergewölbes und Ausbruch des Tunnels in Etappen von 20–30 m Länge. Dem Ausbruch unmittelbar folgend wurde eine Spritzbetonschicht von 10–15 cm Stärke aufgetragen.
- Der Spritzbeton soll ein Ablösen von aufgetautem Lockermaterial entlang dem Ausbruchrand verhindern sowie als Träger der Isolation dienen. Er verstärkt die Tragwirkung des Frostkörpergewölbes und verringert damit das Kriechen des gefrorenen Bodens.

Einachsiale Druckspannung σ (kg/cm^2)	Versuchstemperatur T (°C)		
	−5	−10	−15
5	5 11	1 13	
10	8 9	2	
15		3 6	
30		17	
45		4 15 16	7 10 12

Einachsiale Zugspannung σ_1 (kg/cm^2)	Versuchstemperatur T(°C) −10
2	1
4	2 4 5 7
7	3 6
10	

Bild 5. Zusammenstellung der durchgeführten einaxialen Kriechversuche

a) Druck (oben)
b) Zug (rechts)

- Ausbruch der Sohle und Betonieren des armierten Sohlgewölbes.
- Einbau der Isolation, des Isolationsschutzes und der seitlichen Drainage.
- Aufstellen und genaues Richten der Armierung mit Hilfe besonderer Montagebögen.
- Stellen der Schalung und Betonieren des definitiven Gewölbes in Etappen von 10 m Länge.

Bemessung des Frostkörpergewölbes

Aufgrund des festgelegten Bauablaufes ergaben sich die Randbedingungen für die Bemessung des Frostkörpergewölbes. Dieses musste auf eine Länge von 20–30 m den vollen Überlagerungs- und Seitendruck tragen, da erst am Ende einer Ausbruchetappe das Betongewölbe eingebracht wurde. Wegen der relativ grossen Länge des Frostkörpergewölbes wurde bei der Bemessung nur eine ebene Tragwirkung berücksichtigt. In der Zeit zwischen dem Ausbruch bis zur Fertigstellung des Betontraggewölbes, d.h. während etwa 5–6 Wochen, mussten die Deformationen des Frostkörpergewölbes im tolerierbaren Bereich bleiben.

Die *Bodenkennwerte* als Grundlage für die Bemessung wurden aufgrund von Laborversuchen ermittelt. Die wichtigsten *Ergebnisse der bodenmechanischen Standardversuche* sind:

Bodenklassifikation nach Siebkurven		Cl (toniger Silt)
Raumgewicht		2,0–2,20 t/m^3
Wassergehalt	w	10–25%
Konsistenzgrenzen	W_L	26–36%
	W_p	13–19%
	I_p	8–20%

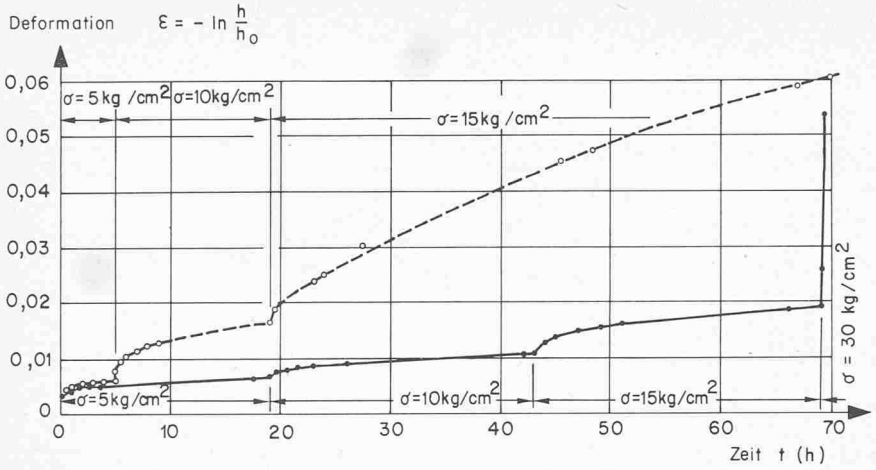


Bild 6. Beispiele von einaxialen Kriechkurven (Temperatur $T = -10\,°C$)

Die Ergebnisse der *einaxialen Kriechversuche* (Bilder 5 und 6) lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Die Druck-Kriechversuche zeigten, dass bei Spannungen um $\sigma = 10$ kg/cm² und einer Temperatur von $T = -10°$ während der vorgesehenen Zeit von 5–6 Wochen mit Deformationen von $\varepsilon = 2\%$ zu rechnen ist. Bei einer Frostkörpertemperatur von $T = -15\,°C$ sind die Deformationen nur noch halb so gross.
- Wegen der häufigen Steineinschlüsse des inhomogenen Probematerials konnten bei den Zugversuchen keine ausgeprägten Kriechkurven ermittelt werden. Das Frostkörpergewölbe wurde so bemessen, dass Zugspannungen nicht vorkamen.

Die Bemessung zeigte, dass bei Gewölbestärken zwischen 2,0 und 3,0 m Randspannungen um $\sigma = 13$ kg/cm² und Mittelspannungen um $\sigma = 10$ kg/cm² auftreten. Für diese Spannungen wurde die erforderliche mittlere Frostkörpertemperatur auf $T = -15\,°C$ festgelegt.

Installationen für die Ausführung der Gefrierarbeiten

Grundsätzlich lassen sich *drei Gruppen* von Installationen unterscheiden:

- Kälteanlage (innerer Kältekreislauf),
- Gefrierbohrungen und Rohrleitungssystem (äusserer Kältekreislauf),
- Kontroll- und Messeinrichtungen.

Bild 4 gibt eine Übersicht über die Anordnung der Installationen für das Gefrieren im Zusammenhang mit den übrigen Arbeiten im Bereich des Nordportales.

Kälteanlage

Die thermischen Kennwerte des Bodens zur Bestimmung der Frostausbreitung und damit der Bestimmung der Kapazität der Kälteanlage und der Anordnung der Gefrierrohre wurden aufgrund von Laboruntersuchungen ermittelt.

Die Kälteerzeugung wurde von einer *zweistufigen Kompression-Kälteanlage* übernommen. Alle Teile der Anlage waren *aus Sicherheitsgründen doppelt ausgelegt*. Die maximale Kühlleistung betrug 440000 kcal/h bei —20 °C der *Chlorkalzium-Sole,* die als *Kälteträger* im *äusseren Kreislauf* der Gefrierrohre zirkulierte. Zur *Kälteerzeugung in der Kältemaschine* wurde *Ammoniak* verwendet.

Die gesamte Kälteanlage, ausser den Verdunstungskondensatoren, wurde in einem Teil der Werkstatt auf einer Fläche von 3,0×15,0 m installiert. Die Aggregate wurden innerhalb der Halle von einer Schallschutzkammer umgeben. Von der Kälteanlage bis zur Gefrierstrecke in einer Entfernung von im Mittel 150 m wurden für den Vor- und Rücklauf der Sole zwei wärmeisolierte Hauptverteilrohre mit 390 mm Durchmesser verlegt (Bild 7).

Gefrierbohrungen und Rohrleitungssystem

Für die Ausführung der Gefrierbohrungen wurde oberhalb des Tunnels ein asphaltiertes Bohrplanum geschaffen. Die Gefrierbohrungen wurden in Querschnitten (Bild 8) angeordnet, mit einem Abstand von 1,73 m in Tunnellängsrichtung. In der fächerförmigen Verteilung der Gefrierrohre um das Tunnelprofil ergaben sich in Tunnelquerrichtung Abstände der

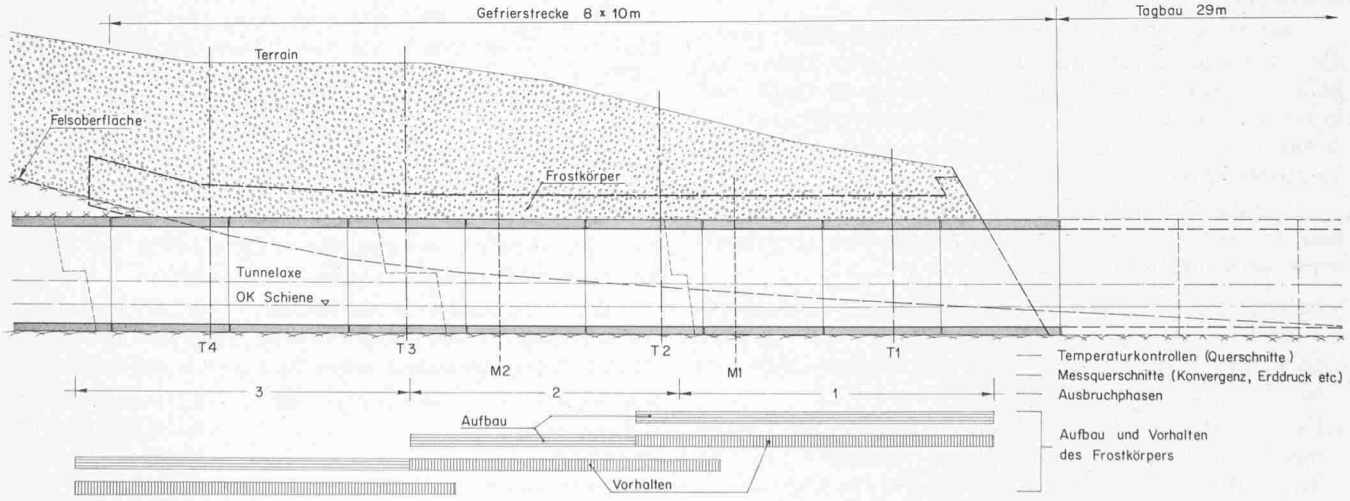


Bild 7. Längsschnitt der Gefrierstrecke mit Einteilung der Gefrieretappen, den Ausbruch- und Ausbauetappen und der Anordnung der Messquerschnitte

Rohre von 1,0 m in den Ulmen und etwa 2,0 m im Scheitelbereich. Seitlich des Profiles wurden die Bohrungen durch die Verwitterungsschicht des Mergels hindurch bis in den gesunden Fels abgeteuft. Es wurde ein *Trockenbohrverfahren mit Luftspülung* angewendet (Bild 9). Die Bohrrohre haben einen Aussendurchmesser von 139,7 mm und eine Wandstärke von 5 mm. Ein exzentrisch rotierender Bohrmeissel bohrt dem Mantelrohr vorauseilend einen Hohlraum, der geringfügig grösser ist als der äussere Rohrdurchmesser. Der Bohrkopf rastet in einen besonderen Rohrschuh ein und zieht so beim Schlagen die gesamte Verrohrung nach.

Um den Frostkörper nur dort zu bilden, wo er statisch notwendig war, also nicht entlang der ganzen Bohrung bis zur Geländeoberfläche, wurden innerhalb der Mantelrohre der Gefrierbohrungen sogenannte *Gefriertöpfe* (Bild 10) versetzt. Der Spalt zwischen dem Topf und dem Mantelrohr wurde mit Bentonit gefüllt. Der Wärmeübergang zwischen der Kühlsole und dem Boden findet so nur auf der Länge des Gefriertopfes statt. Die Leitungen des Vor- und Rücklaufes werden innerhalb des Bohrrohres ohne Kontakt zum Erdreich bis zum oberen Ende des Gefrierrohres geführt. Mit dieser Massnahme konnte der Energieverbrauch vermindert werden. Ein Stau des Hangwassers bergseits der Gefrierstrecke wurde durch die Beschränkung des Frostkörpers verhindert.

Kontroll- und Messeinrichtungen

Bei den Messungen sind zwei Zielrichtungen zu unterscheiden:

- Kontrolle des Frostkörpers und
- Überwachung der Tunnelverkleidung und des darauf wirkenden Erddruckes.

Zur ersten Gruppe gehören *Temperaturmessungen in besonderen Bohrlöchern* (Bild 8), die in vier Schnitten so zwischen die Gefrierrohrebenen angeordnet wurden, dass sie den Zeitpunkt des Zusammenwachsens der «Gefriersäulen» im massgebenden Bereich erfassen. Die Bohrungen der Temperaturmessungen sowie die Gefrierbohrungen der beiden benachbarten Querschnitte mussten genau vermessen werden, um die Messergebnisse schlüssig zu interpretieren. Zur Überwachung des Frostfortschrittes nach aussen sind in den Messquerschnitten auch ausserhalb der äusseren Gefrierrohre Temperaturmessbohrungen ausgeführt worden.

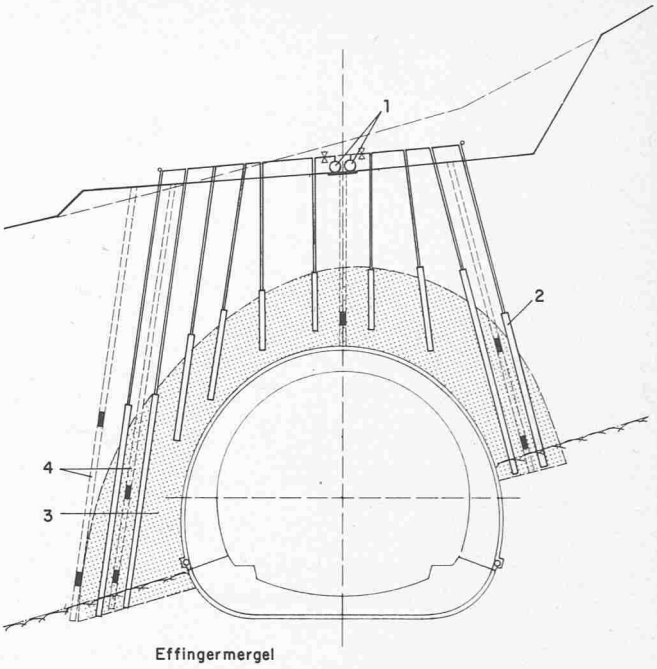


Bild 8. Anordnung der Gefrierrohre im Bereich des Querschnittes der Temperaturkontrollen T_1

1 Hauptleitungen für Vor- und Rücklauf der Sole
2 Gefriertopf mit Vor- und Rücklaufleitungen
3 Gefrierkörper
4 Bohrlöcher für Temperaturkontrollen

Weitere Messungen betreffen die Temperaturen der Sole im Vor- und Rücklauf der Gefrierrohrstränge.

Die zweite Gruppe der Messungen ist in Bild 11 zusammengestellt. Im Freien werden die *Bewegungen des Terrains* mit geodätischen Messungen, Präzisionsnivellements sowie Inklinometermessungen im Bohrloch *(slope indicator)* überwacht. Die

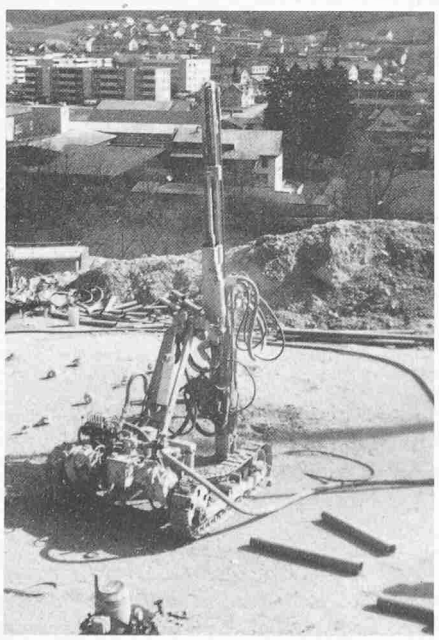


Bild 9 (links). Bohrgerät für Gefrierbohrungen

Bild 10 (rechts). Versetzen der Gefriertöpfe

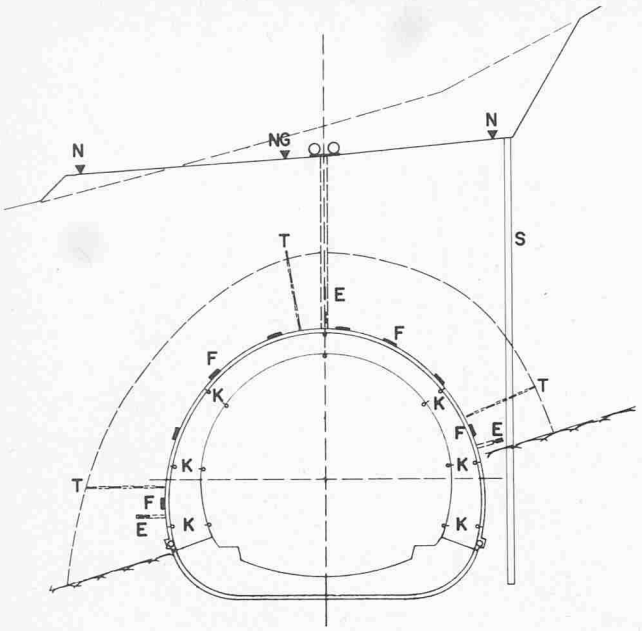
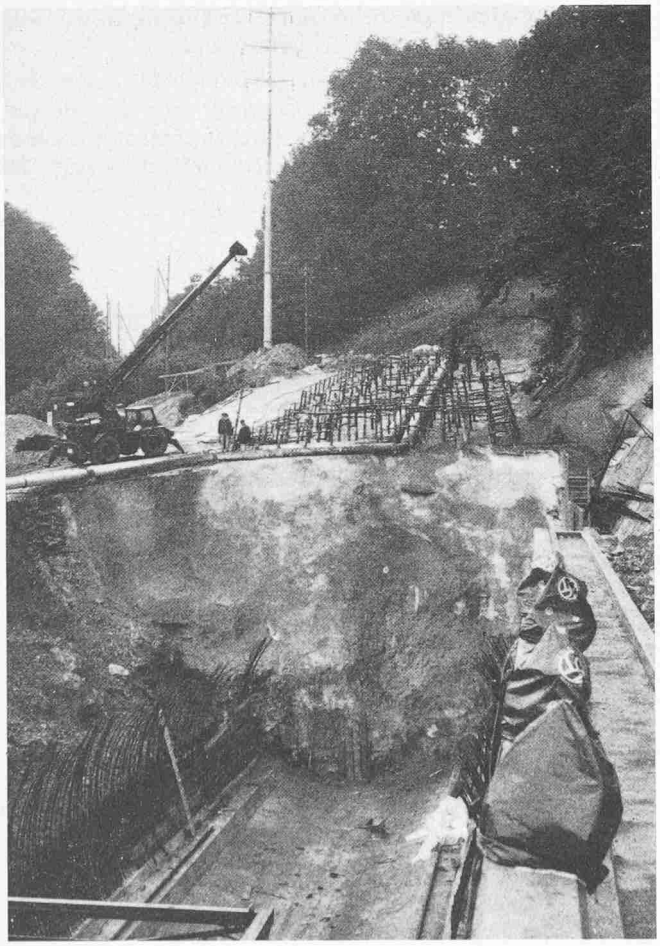


Bild 11. Messquerschnitt M_1, N Nivellemmentpunkt, NG Nivellementpunkt kombiniert mit geodätischer Verschiebungsmessung, S «slope indicator» Inklinometermessung, T Temperaturmessung mit je 4 Messpunkten auf 3,0 m Länge, E Erddruckmessdosen, F Fugendurckmessdosen, K Konvergenzmessbolzen

Bild 12. «Startgrube» der Tunnelausbrucharbeiten im Bereich der Tagbaustrecke mit Gefrierplanum im Hintergrund



Tunnelverkleidung und deren Belastung wurden in zwei Messquerschnitten durch *Konvergenzmessungen* und *Fugendruckmessdosen* kontrolliert. Durch zusätzliche Temperaturgeber, die in Radialbohrungen vom Tunnel aus verlegt wurden, wird die Temperatur des Bodens nach dem Einstellen der Gefrierarbeiten weiter kontrolliert.

Verlauf der Gefrierarbeiten

Eine Übersicht über die Phasen des Aufbaues der Frostkörperabschnitte bzw. des Vorhaltens während des Ausbruchs und der Verkleidung des Tunnels gibt der Längsschnitt (Bild 7).

Der Beginn des Aufbaus des ersten Frostkörperabschnittes musste auf die Vorbereitungsarbeiten im Voreinschnitt abgestimmt werden. Zur Vorbereitung der «Startgrube» für den Ausbruchbeginn mussten auf einen etwa 60,0 m langen Bereich vor der Angriffsfläche die Verankerungsarbeiten der Bohrpfahlwand, das Sohlgewölbe des Tagbauprofiles sowie eine Zufahrtsschneise erstellt werden (Bild 12).

Die Temperaturaufzeichnungen im Messquerschnitt T_1 am Anfang der Gefrierstrecke (Bild 13) zeigt den Temperaturverlauf während des Gefriervorganges. Zu Beginn des Frostkörperaufbaues war innerhalb einer Woche ein starker Temperaturabfall festzustellen. Dann verharrte die Temperaturkurve infolge Erreichen des Erstarrungspunktes etwa 1 Woche in der Nähe der Nullgrad-Grenze, bevor sie wieder steil gegen die erforderlichen Temperaturen von —15 °C abfiel. *Im Mittel wurden vier Wochen benötigt, um einen Frostkörper aufzubauen.* Die mittlere Temperatur der Sole im Vorlauf bewegte sich während der Zeit der Gefrierarbeiten um —35 °C, die Rücklauftemperatur war im Mittel etwa 5 °C höher.

Nach dem Abstellen der Gefriereinrichtungen beim Messquerschnitt T_1 dauerte es etwa zwei Monate bis die Frostkörpertemperatur den Nullpunkt überschritt.

Ausbruch des Tunnels

Nachdem die Messungen die angestrebten Temperaturen des Frostkörpers anzeigten, wurde mit dem Ausbruch des Tunnels begonnen. Zuerst wurde die Kalotte auf der vorgesehenen Etappenlänge von 20–30 m ausgebrochen. Der Spritzbeton wurde unmittelbar dem Ausbruch folgend aufgebracht. Dann folgte der Aushub und der Spritzbeton der Strosse. Der Ausbruch wurde mit Hilfe einer schweren *Teilschnittmaschine* ausgeführt, die sich für den Abbau von gefrorenem Erdreich sowie der zahlreichen grossen Kalkblöcke hervorragend bewährt hat.

Infolge der hohen Lufttemperaturen im Tunnel von etwa +18 °C stieg die Frostkörpertemperatur am Ausbruchrand über Null und nach kurzzeitigem Auftreten eines Filmes aus Kondensationseis kam es zum Abbröckeln von Lockermaterial. Mit einer Haftung des Spritzbetons direkt auf dem Untergrund konnte somit nicht gerechnet werden.

Folgende Lösung für das Vorgehen beim Ausbruch und das Aufbringen des Spritzbetons hat sich dann eingespielt:

- Halbseitiger Ausbruch der Kalotte bis etwa 50 cm unterhalb des theoretischen Ausbruchrandes auf einer Länge von 3,0–4,0 m;
- Profilieren bis zum Ausbruchrand;
- Befestigen eines Armierungsnetzes mit 100 mm Maschenweite mittels kurzer Anker auf dem harten Frostuntergrund;
- Aufbringen des Spritzbetons, sukzessiv bis zur vorgesehenen Stärke von etwa 15 cm.

Der Ablauf der Arbeiten und der Zeitbedarf der einzelnen Phasen ist im Bauprogramm (Bild 14) dargestellt. Die mittlere Leistung unter Berücksichtigung der Anlaufschwierigkeiten

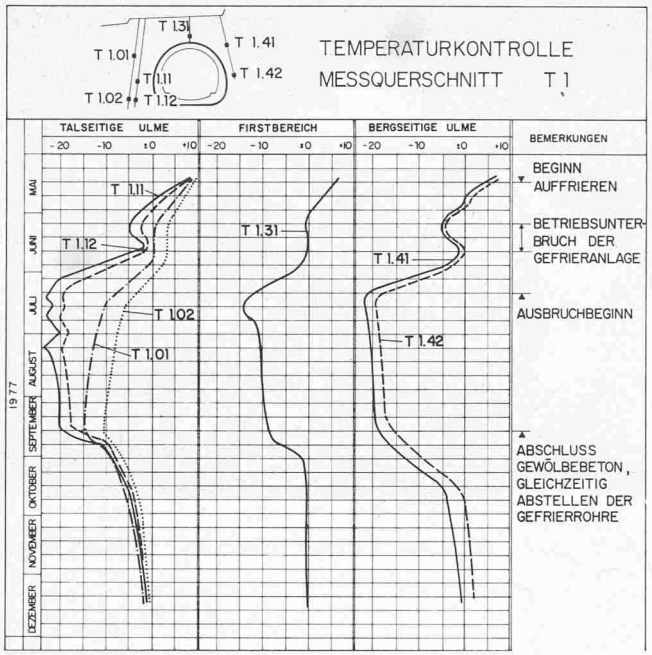


Bild 13 (links). Verlauf der Temperaturen im Gefrierkörper beim Messquerschnitt T_1

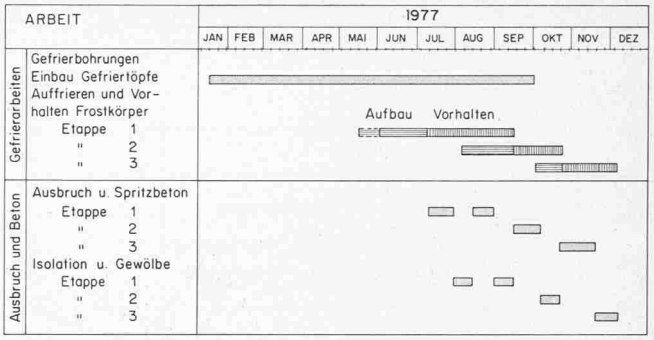


Bild 14 (oben). Verlauf der Arbeiten in der Gefrierstrecke

war 0,8 m/Arbeitstag für den Ausbruch und die definitive Verkleidung des Tunnels inkl. das Aufbringen der Isolation. Für den Ausbruch und das Aufbringen des Spritzbetons alleine betrug die mittlere Leistung 1,35 m/Arbeitstag.

Spritzbeton auf gefrorenem Untergrund

Im Zusammenhang mit dem Aufbringen von Spritzbeton direkt auf einem gefrorenen Untergrund stellte sich die Frage nach der *Abbindemöglichkeit des Betons,* den *erreichbaren Festigkeiten* und der *Beeinflussung des Frostkörpers* durch die Abbindewärme.

Aus dem Schachtbau und neueren Anwendungen des Gefrierverfahrens im Tunnelbau lagen Erfahrungen über das Betonieren gegen sogenannte Frostwände vor. Danach wurde beim Borntunnel angenommen, dass mindestens 10–15 cm Spritzbetonstärke notwendig seien, damit der Beton genügend Abbindwärme erzeugen kann, um in den ersten Tagen auf seiner ganzen Stärke zu erhärten.

Im Zusammenhang mit diesen Fragen und zur Überprüfung der getroffenen Entscheidungen wurde am Borntunnel durch die Bauleitung und die Unternehmung eine kleine Untersuchung durchgeführt. Die Versuchsanordnung und die Ergebnisse werden hier kurz mitgeteilt.

Am Ende einer Ausbruchetappe wurde auf den Frostkörper und auf die nicht gefrorene Brust Spritzbeton aufgetragen. Im Spritzbeton und im Frostkörper wurden sechs Temperaturfühler angeordnet, zwei im Frostkörper, einer am Ausbruchrand und drei im Spritzbeton. Der Temperaturverlauf wurde durch ein schreibendes Messgerät aufgenommen (Bild 15).

Zur Prüfung der *Druckfestigkeit* des Spritzbetons auf gefrorenem bzw. ungefrorenem Untergrund wurden nach 3, 7, 19 und 25 Tagen je 4–5 Bohrkerne je Einbauort entnommen und untersucht.

Aufgrund der *Temperaturkurven* hat sich der Auftauvorgang infolge der Abbindewärme des Spritzbetons bis etwa 15 cm in den Frostkörper hinein entwickelt.

In Bild 16 sind die mittleren Werte der Druckfestigkeiten des Spritzbetons angegeben. Die Streuung der Einzelresultate beim Spritzbeton auf gefrorenem Untergrund war bedeutend grösser als bei jenen auf nicht gefrorenem Untergrund.

Ergebnisse der Messungen

Der Verlauf der Temperaturmessungen aus den Messbohrungen in Richtung der Gefrierrohre ist bereits erläutert

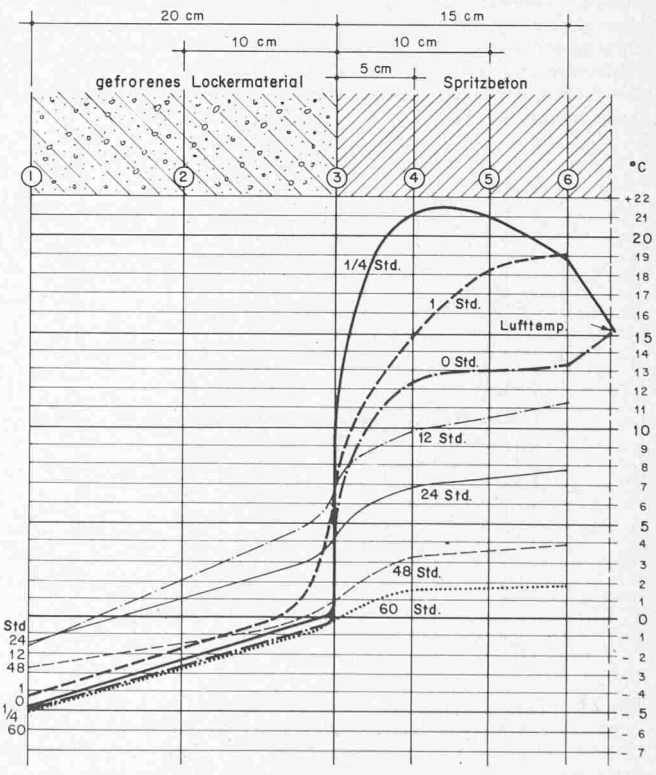


Bild 15. Temperaturverlauf im Spritzbeton und im angrenzenden Frostkörper

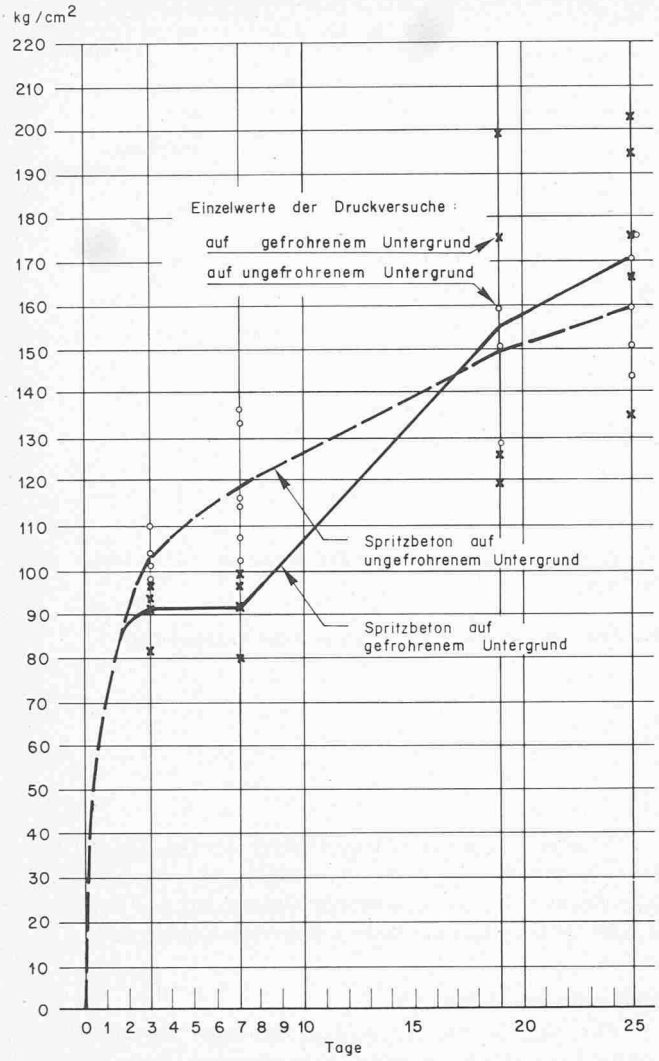


Bild 16. Vergleich der Zylinderdruckfestigkeiten von Spritzbeton, welcher gleichzeitig auf gefrorenem und auf ungefrorenem Untergrund aufgebracht wurde, Proben ϕ 40 mm, H 40 mm, Mischung: 400 kg Portlandzement auf 1000 l Zuschlagstoffe (70 % ϕ 0–4 mm, 30 % ϕ 4–8 mm), Abbindebeschleuniger SIKA N5 flüssig (Wasser: Abbindebeschleuniger 4.5 : 1)

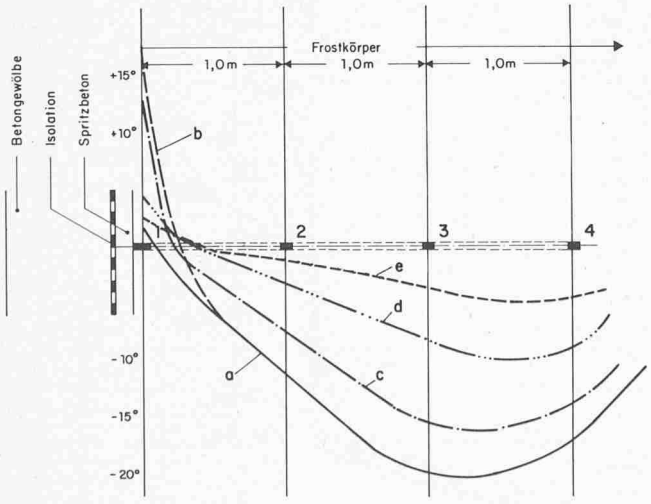


Bild 17. Temperaturverlauf in einer Radialbohrung im Messquerschnitt M_1. a mittlere Kurve während der Standzeit des Ausbruches bis zum Einbringen des Betongewölbes, b 3 Tage nach Einbringen des Gewölbebetons und gleichzeitigem Abstellen der Gefriereinrichtungen in diesem Bereich, c, d, e. 7 Tage, 3 Wochen resp. 2 Monate nach Abstellen der Gefriereinrichtung

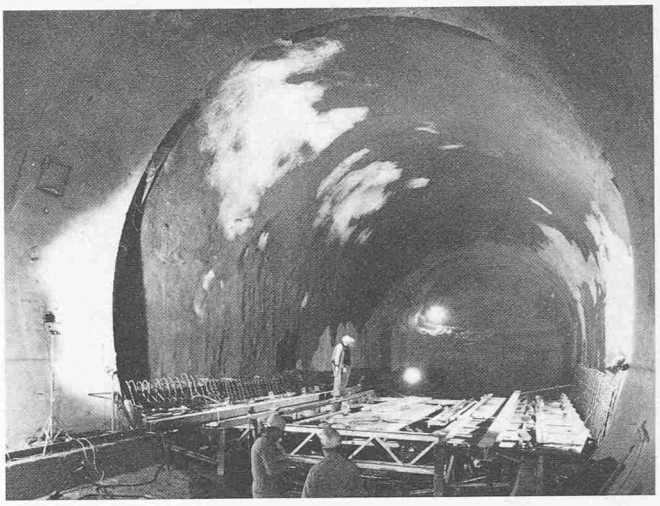


Bild 18. Vollausbruch einer Etappe und Betonieren des Sohlgewölbes

worden (Bild 13). Die Temperaturmessungen, in Radialbohrungen vom Tunnel aus ausgeführt, wurden hauptsächlich als Interpretationshilfe für die Erddruckmessungen angeordnet. Es liess sich damit aber auch ausgezeichnet der Einfluss der Abbindewärme des Gewölbebetons und des Abstellens der Gefrierstränge auf den Temperaturverlauf im Frostkörpergewölbe feststellen (Bild 17).

Die *Erddruckmessungen* lassen sich im Moment noch nicht interpretieren, da der Frostkörper zum grössten Teil noch besteht.

Die *Konvergenzmessungen am Spritzbeton* haben Verschiebungen des Firstpunktes von max. 5 mm ergeben. Erwartet waren 10 mal grössere Verformungen infolge Kriechens. Die Gründe für die geringen Deformationen sind im Anwachsen des Frostkörpergewölbes über die vorgesehene Grösse hinaus und im Ausbauwiderstand des Spritzbetons zu suchen.

Das Oberflächennivellement hat während der Ausbruchzeit *keine Setzung der Geländeoberfläche* angezeigt. Beim Aufbau des Frostkörpers sind hingegen Hebungen von im Mittel 50 mm festgestellt worden. Sie lassen sich aus der geringen Überlagerung sowie aus der Beobachtung erklären, dass der Eiskörper infolge seitlichen Wasserzuflusses weiter als vorgesehen anwuchs.

Schlussfolgerungen

Die Anwendung des Gefrierverfahrens am Borntunnel kann als ein voller Erfolg angesehen werden. Im Vergleich zu komplizierten Teilausbruchverfahren in schwierigen Verhältnissen beeindruckte vor allem der grosse, ohne weitere Einbauten tragende Hohlraum (Bild 18), der für ausgezeichnete Arbeitsverhältnisse sorgte.

Bauherr:	Schweizerische Bundesbahnen, Kreisdirektion II
Ausführung:	Arbeitsgemeinschaft Borntunnel Marti AG, Solothurn, Rothpletz, Lienhard & Cie AG, AG Conrad Zschokke, Zürich, Ph. Holzmann AG, (Unterakkordant für Gefrierarbeiten)

Der Milchbuck-Strassentunnel bei Zürich

Situation – Geologische Verhältnisse – Problemstellung für die Realisierung des Bauvorhabens

Der 1310 m lange Milchbucktunnel ist ein *Teil der stadtzürcherischen Expressstrassen*. Im Endausbau wird die Tunnelanlage aus zwei parallelen Röhren mit je drei Fahrspuren bestehen, wobei jede Tunnelröhre den aussergewöhnlich grossen Ausbruchquerschnitt von rund 140 m² aufweisen wird. In einer *ersten Ausbauphase* ist vorgesehen, nur die *Oströhre* zu bauen. Die folgenden Ausführungen über Baumethode, -ausführung und -programm beziehen sich deshalb ausschliesslich auf diese erste Ausbauphase (Bild 19 und 21).

Die Tunnelstrecke lässt sich in *geologischer Hinsicht* in zwei grundsätzlich verschiedene Abschnitte unterteilen (Bild 20):

- Im nördlichen, etwa 960 m langen Abschnitt, der sogenannten *Molassestrecke,* wird die *Süsswassermolasse* – grösstenteils aus *Wechsellagerungen von Mergeln und Sandsteinen* bestehend – durchfahren. Die Abstände zur starkbebauten Geländeoberfläche variieren zwischen 25 und 35 m.
- Im südlichen, etwa 350 m langen Abschnitt, der sogenannten *Moränestrecke,* muss eine grösstenteils *kompakt* gelagerte Moräne durchörtert werden. Charakteristisch für diese Moräne sind *sandig-siltige Einlagerungen* sowie das Vorhandensein von *artesisch gespanntem Hangwasser*. Die Einlagerungen sind grundbruchgefährdet.

Die Überlagerungen zu Gebäuden und Strassen betragen im Anfangsbereich dieser bautechnisch schwierigen Zone nur 6–8 m. Eine der wichtigsten Zielsetzungen für den Bau des Tunnels besteht deshalb darin, an der Geländeoberfläche das Entstehen von unzulässigen Setzungen zu verhindern.

Baumethode in der Moränestrecke

Neben herkömmlichen Verfahren wie z. B. dem Schildvortrieb oder der «Deutschen Baumethode» schien es angezeigt, das im Ausland im städtischen Tunnelbau in den letzten Jahren des öftern erfolgreich angewendete Gefrierverfahren auch in Betracht zu ziehen und als mögliche Ausführungsvariante auszuschreiben. So haben die früher gemachten Erfahrungen eindeutig gezeigt, dass das Gefrierverfahren bei sorgfältiger Ausführung der angestrebten Zielsetzung – *Geringhalten von Setzungen an der Geländeoberfläche* – am nächsten kommen würde. Vorversuche haben zudem die Eignung des vorliegenden Moränenmaterials für die Anwendung des Gefrierverfahrens bestätigt.

Ein gewichtiges, bei der Baumethodenbeurteilung für das Gefrierverfahren günstiges Argument war zudem die Erkenntnis, dass bei dieser Baumethode Unterfangungen der Gebäudefundamente im Einflussbereich des Tunnels entfallen würden. Wegen der vorliegenden Verhältnisse (dicht bebautes Wohngebiet mit starkem öffentlichem und privaten Verkehrsaufkommen) wäre die Ausführung solcher Unterfangungsarbeiten bautechnisch ausserordentlich kompliziert und schwierig und demzufolge auch zeitaufwendig und kostspielig gewesen.

Für die Durchörterung der Moränestrecke hat sich das Gefrierverfahren unter Berücksichtigung aller mit der je-

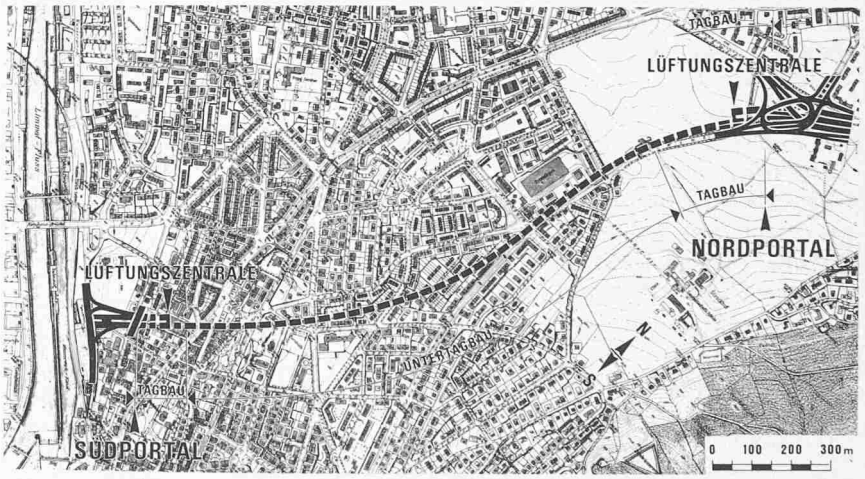


Bild 19. Situation Milchbucktunnel

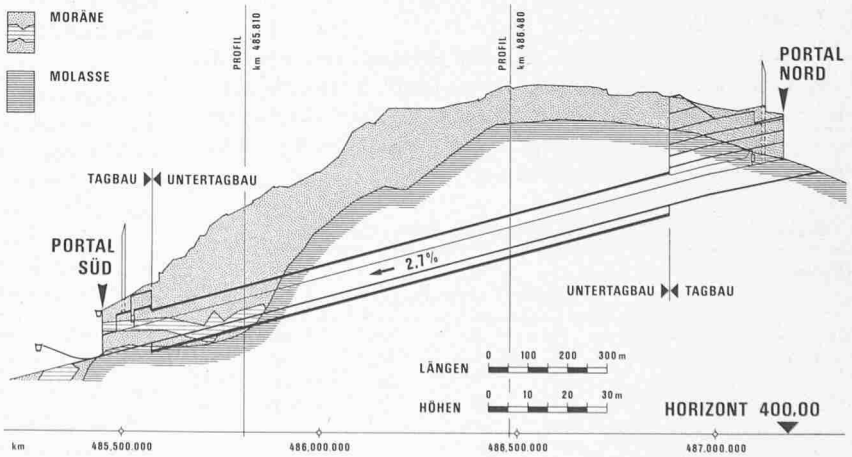


Bild 20. Geologisches Längenprofil

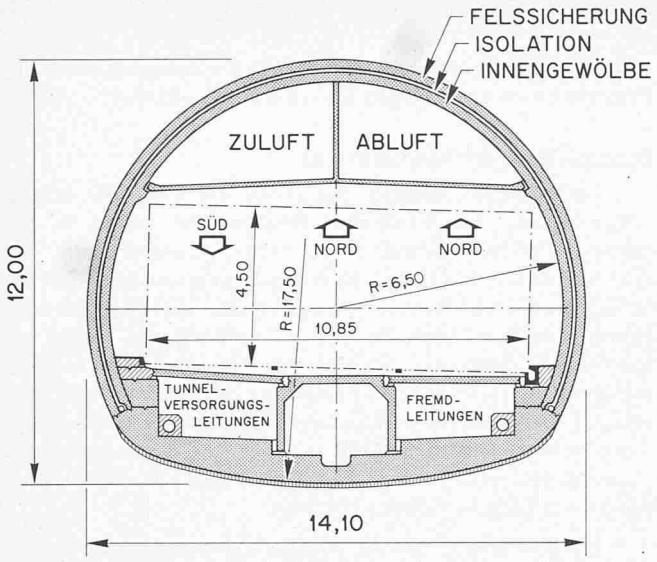


Bild 21. Normalprofil Tunnel

weiligen Baumethode verbundenen Folgekosten als die technisch, wirtschaftlich und auch bauprogrammlich günstigste Lösung erwiesen.

Durchgeführte spezifische Voruntersuchungen

Neben den üblichen geologischen und hydrologischen Untersuchungen in der Moränestrecke des Milchbucktunnels war es auch unumgänglich, spezifische, auf das Gefrierverfahren ausgerichtete Versuche durchzuführen. Die *Laborversuche* umfassten im wesentlichen die folgenden Untersuchungen:

- Bodenmechanische Standardversuche,
- Triaxialversuche mit gefrorenen Bodenproben,
- Frosthebungsversuche,
- Einaxiale Kriechversuche mit gefrorenen Bodenproben.

Als wesentlichste Erkenntnisse müssen aus den am *Institut für Grundbau und Bodenmechanik* (IGB) der *ETHZ* durchgeführten Versuche hervorgehoben werden:

- Versuche an gefrorenen Bodenproben haben sowohl im einaxialen als auch im dreiaxialen Druckversuch Druckfestigkeiten ergeben, welche die Erstellung eines Frostkörpergewölbes mit genügender Tragkraft ermöglichen.
- Das Grundwasser ist vor dem Gefriervorgang zu entspannen bzw. abzusenken. Damit kann die Gefahr unerwünschter Bodenhebungen im Bereiche geringer Überlagerungen gebannt und die Standsicherheit der Ortsbrust besser gewährleistet werden.

Die im *Voreinschnitt Süd* im Bereiche des künftigen Tunnelportales durchgeführten *Horizontalbohrversuche* haben gezeigt, dass mit genügender Sorgfalt und mit der Verwendung geeigneter Installationen die vorgeschriebene Bohrgenauigkeit eingehalten werden kann.

Tabelle 1. Bodenkennwerte, Primärspannungszustand

Bodenart	γ (kN/m³)	C (N/cm²)	φ (°)	E (N/cm²)
Aufgelockerte Moräne	23	0	30	4 000
Kompakte Moräne	23	0	30	8 000– 15 000
Molasse	23	8	26	100 000–300 000
Gefrorener Boden	23	75	0	20 000– 40 000
Primärspannungszustand:				
vertikale Spannung			$\sigma_v = \gamma_h$	
horizontale Spannung			$\sigma_h = (1/2 \div 2/3)\,\sigma_v$	

Felsmechanisch-statische Berechnungen

Für die *quantitative* Prognose über das Verhalten von Baugrund und Frostgewölbe während des Tunnelvortriebes sowie als Grundlage für die Bemessung von Frostkörper und Tunnelgewölbe wurden Berechnungen nach der *Methode der finiten Elemente* durchgeführt. Zur Anwendung gelangte das Programm Staub [1]. Untersucht wurde ein *zweidimensionales System* (ebene Scheibe), bestehend aus *Tunnel, Frostkörpergewölbe* und *Baugrund*. Das Problem wurde als *ebener Verschiebungszustand* behandelt. Sowohl für den ungefrorenen als auch für den gefrorenen Boden wurde ein *elastisch-idealplastisches Stoffgesetz* angenommen. Die Eingabewerte für die Berechnungen sind in Tabelle 1 zusammengestellt.

Der Rechnungsvorgang erfolgte in zwei Schritten, ausgehend von folgenden Überlegungen:

- Das Frostkörpergewölbe wird im primären Spannungszustand im Baugrund erstellt. Beim nun folgenden Vollausbruch des Tunnels übernimmt es den ganzen «Gebirgsdruck». In Baugrund und Frostkörpergewölbe stellt sich der sekundäre Spannungs- und Verformungszustand ein.
- Nun wird das äussere Tunnelgewölbe – vorläufig unbelastet – eingebaut. Die zusätzliche Spannungsumlagerung im Baugrund und dadurch eine Belastung und Verformung der Tunnelauskleidung erfolgen durch das Auftauen des Frostkörpergewölbes oder durch den Wegfall der entsprechenden Tragwirkung. In der Berechnung wurde dies mit einem Ersetzen des gefrorenen durch ein ungefrorenes Bodenmaterial – bzw. durch Ändern der entsprechenden Kennwerte – eingeführt.

Die Resultate der Berechnung sind in Bild 22 zusammengestellt. In ihr wird allerdings die räumliche Tragwirkung des Frostkörpers vernachlässigt; tatsächlich ist aber die «Frostkörperschale» vor der Tunnelbrust im Baugrund sowie im Bereiche, wo das Tunnelbetongewölbe bereits eingezogen ist, auf ihrer ganzen Abwicklung «elastisch» gelagert. Die an der ebenen Scheibe berechneten Werte sind deshalb entsprechend zu interpretieren.

Geplantes Vorgehen in der Moränestrecke

Allgemeine Disposition

Beim Milchbucktunnel werden sämtliche mit dem Gefrierverfahren verbundenen Arbeiten *aus dem Tunnel selbst* durchgeführt. Diese zum Borntunnel abweichende Ausführungsart ist weitgehend durch die vorliegenden örtlichen Verhältnisse bedingt. So wäre die Durchführung der Gefrierarbeiten von der Oberfläche her infolge der dichten Bebauung des Gebietes nur unter Inkaufnahme schwerwiegender Störungen und Immissionen für die Anwohner sowie für den öffentlichen und privaten Verkehr möglich gewesen.

Es ist vorgesehen, in Abschnitten von rund 33 m ein Frostkörpergewölbe konzentrisch um den künftigen Hohlraum herum aufzubauen. Dazu müssen *parallel zur Tunnelaxe* Gefrierrohre in das den künftigen Hohlraum umgebende Material gebohrt werden. Durch die Gefrierrohre zirkuliert die Gefrierflüssigkeit mit einer Temperatur von etwa —22 °C bis —40 °C, wobei sich um die einzelnen Gefrierrohre gegenseitig überschneidende Frostzylinder aufbauen, die als Gesamtheit das Frostkörpergewölbe bilden.

Durch Veränderung der Abstände und der Lage der Gefrierrohre ist es möglich, *verschiedene Frostkörpertypen* herzustellen. Für den Bau des Milchbucktunnels in der Moränenstrecke wird je nach geologischen und topographischen Verhältnissen grundsätzlich einer der folgenden Frostkörpertypen angewendet:

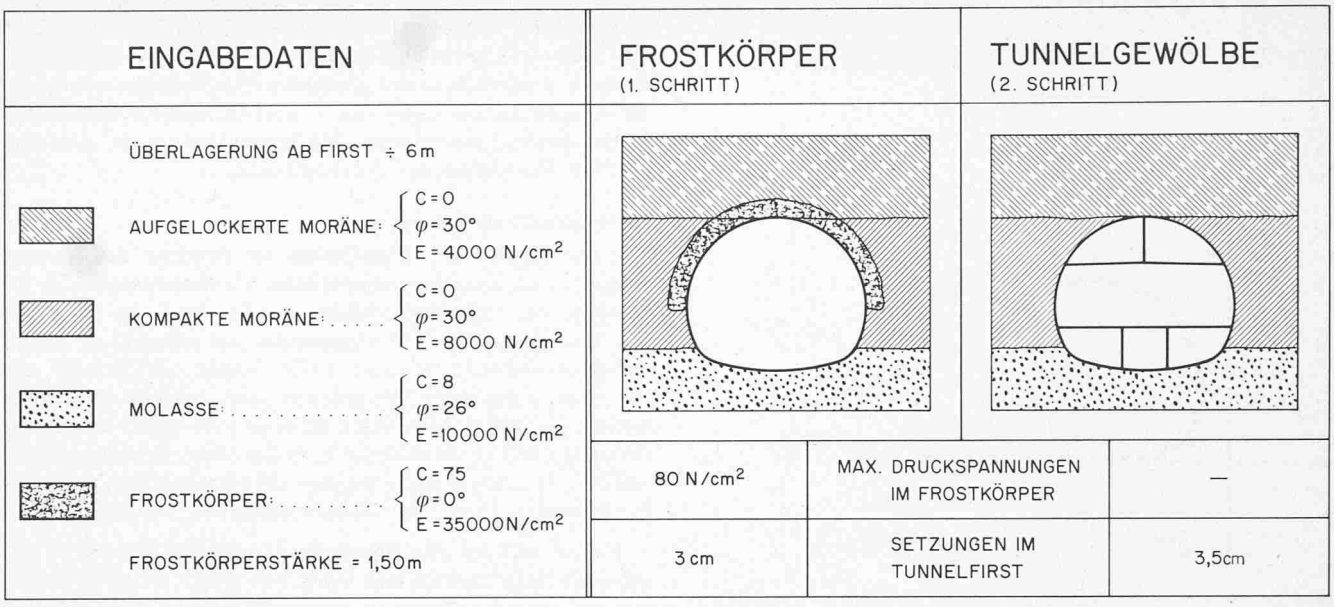


Bild 22. Resultate einer Berechnung (Spannungen, Deformationen)

Frostkörpertyp A: Gewölbestärke d = 1,50 m, Sektor = 120°
Frostkörpertyp B: Gewölbestärke d = 2,00 m, Sektor = 120°
Frostkörpertyp C: Gewölbestärke d = 1,50 m, Sektor = 180°
Frostkörpertyp D: Gewölbestärke d = 1,50 m, bis auf den Fels hinunter reichend

Durch das Variieren der Kühlflüssigkeitstemperatur und der Aufbaudauer des Frostkörpers können zusätzlich die Eigenschaften des gefrorenen Bodens geändert werden.

In der schematischen Darstellung des Bauvorganges (Bild 23 und 24) ist der Querschnitt mit dem Frostkörpertyp C dargestellt.

Im Schutze des Frostkörpers wird der Tunnelquerschnitt in mehrfacher vertikaler und horizontaler Unterteilung ausgebrochen, und zwar so, dass rasch nach dem ersten Teilausbruch das ganze Profil ausgebrochen sein wird. Der Materialabbau erfolgt mittels eines schweren Hydraulikbaggers, der von einer Schleppbühne oder von der Tunnelsohle aus das Material abträgt. Dabei wird, dem Ausbruch folgend, das tragende Aussengewölbe, bestehend aus mehreren Lagen Spritzbeton, Armierungsnetzen und Einbaubogen, mit einer Gesamtstärke von 40 cm erstellt. In kurzem Abstand zur Tunnelbrust wird das Sohlgewölbe nachgezogen, so dass innerhalb weniger Tage das Spritzbetongewölbe und die Tunnelsohle als tragendes Aussengewölbe wirken können. Anschliessend werden die Tunnelisolation und der Innenring eingebaut.

Dieses Vorgehen hat zur Folge, dass der Frostkörper in einem bestimmten Querschnitt jeweils nur auf eine kurze Distanz und während einer relativ kurzen Zeit die aus der Auflast resultierenden Beanspruchungen aufzunehmen hat. Auch können mit ihm die Kriechbewegungen und somit die Deformationen des Bodens klein gehalten werden – praktisch aber nur dort anzuwenden, wo ein Aussengewölbe aus Spritzbeton mit nicht zu grossen Stärken als Traggewölbe in Frage kommt. Beim Borntunnel liess sich diese Methode nicht anwenden, weil der Hangschub zu gross war und deshalb ein 75 cm starkes Betontraggewölbe erforderte.

Am Ende eines jeden Gefrierabschnittes wird der Tunnelquerschnitt auf eine Länge von etwa 8 m konzentrisch erweitert. Dadurch werden die Nischen geschaffen, aus denen

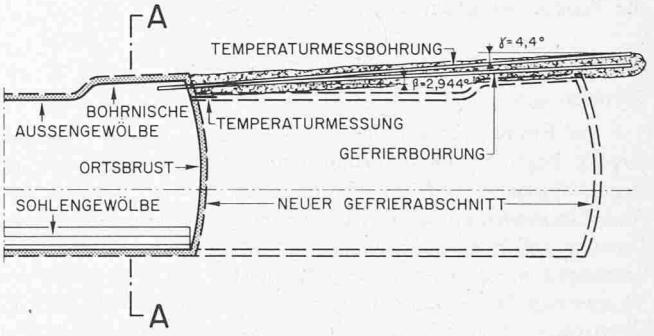


Bild 23. Schematischer Längsschnitt durch Gefrierabschnitt

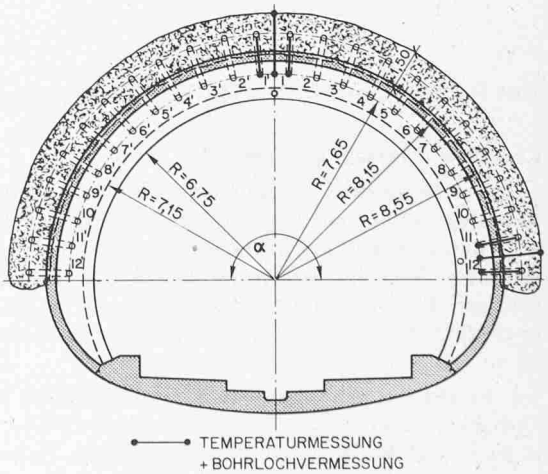


Bild 24. Schnitt AA: Frostkörper Typ C

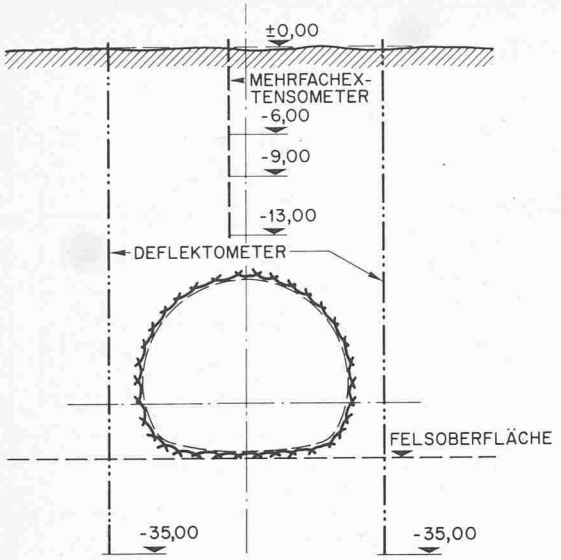


Bild 25. Schematische Darstellung der Extensometer-/Deflektometerlage in bezug auf den Tunnelquerschnitt

die Bohrungen für den nächsten Gefrierabschnitt angesetzt werden können.

Während der Erstellung der Gefrierbohrungen und des Aufbaues des Frostkörpers für den nächsten Abschnitt müssen die Tunnelvortriebsarbeiten eingestellt werden.

Sicherheitsvorkehrungen – Begleitmassnahmen

Werkleitungen

Im Einflussbereich der Tunnelarbeiten in der Moränestrecke liegen zahlreiche *Haupt- und Verteilleitungen für die Gas-, Wasser- und Stromversorgung* sowie verschiedene *Kanalisationsleitungen*. Einzelne Werkleitungen sind älteren Datums und in einem Zustand, der selbst kleine differentielle Setzungen nicht zulässt. Deshalb werden vor Aufnahme der Tunnelbauarbeiten die – trotz Wahl der bezüglich Setzungen günstigsten Baumethode – immer noch gefährdeten älteren Leitungen und die empfindlichen Hausanschlüsse gesichert und teilweise neu verlegt. Durch die Wahl des Gefrierverfahrens kann aber eine wesentliche Reduktion der notwendigen Werkleitungssicherungen erreicht werden.

Grundwasserentspannung

Zur weitgehenden Verminderung des Grundbruchrisikos während der Ausführung der Vortriebsarbeiten wird das Grundwasser entspannt. Dies geschieht mittels einer Vielzahl von klein- und grosskalibrigen *Filterbrunnen* längs des Tunneltrassees. Zusätzlich zu den genannten Oberflächenmassnahmen ist vorgesehen, im Laufe des Tunnelvortriebes systematische Entwässerungsmassnahmen *(Entlastungsbohrungen* und *Einsatz von Vakuumlanzen)* durchzuführen.

Deformationsmessungen

Seit Beginn der Bauarbeiten im Bereiche des Voreinschnittes Süd wurden systematische *Nivellementkontrollen für Gebäude und Geländeoberflächen* durchgeführt. Im Blick auf den Tunnelbau in der Moränestrecke und während der Phase der Pumpversuche (Herbst 1977) wurde der Bereich der Nivellementkontrollen vergrössert und verfeinert. Zurzeit werden periodisch Messungen an etwa 100 Stellen im Bereich der ersten 350 Tunnelmeter, d.h. in der Moränestrecke, durchgeführt. Die Messungen werden selbstverständlich während der gesamten Dauer der Tunnelbauarbeiten weitergeführt.

Zusätzlich zu den Nivellementkontrollen werden in geeigneten Querschnitten eine Reihe von *Extenso- und Deflektometern* versetzt, periodisch gemessen und ausgewertet. Die laufenden Kontrollen der Bewegungen des Baugrundes erlauben es, Rückschlüsse auf die zu erwartenden totalen Deformationen zu ziehen, und zwar durch einen laufenden Vergleich der durch die Rechnung vorausbestimmten theoretischen Deformationswerte mit den effektiven in situ gemessenen Werten. Sie ermöglichen damit, zweckmässige Anpassungen beim Bauvorgang (z.B. Wahl des Frostkörpertyps für den folgenden Gefrierabschnitt) vorzunehmen.

In der Tunnelröhre selbst werden zur Kontrolle der Deformation des Ausbruchprofiles und der Spritzbetonverkleidung verschiedene *Konvergenzmessquerschnitte* ausgebildet (Bild 25).

Bauprogramm Gefrierverfahren

Die Installations- und übrigen Vorbereitungsarbeiten für den Vortriebsbeginn sind bereits im Gange. Es ist aus heutiger Sicht damit zu rechnen, dass die Gefrier- und Vortriebsarbeiten in der Moränenstrecke im März/April 1978 beginnen. Sie werden voraussichtlich bis gegen Ende 1979 dauern.

Bauherr:	Baudirektion des Kantons Zürich, vertreten durch das Tiefbauamt
Ausführung:	Arbeitsgemeinschaft Tunnel Milchbuck Locher & Co., AG Prader AG A. Brunner's Erben, Ph. Holzmann AG (Unterakkordant für Gefrierarbeiten)

Der Pilotstollen für den Du-Toitskloof-Strassentunnel in Südafrika

Einleitung – Projektübersicht

Das *Department of Transport* als Bauherr plant eine *Autobahn Kapstadt–Johannesburg*, die etwa 70 km östlich von Kapstadt den *Höhenzug der Klein-Drakensteinberge* durchquert. Im Rahmen dieser Durchquerung ist ein zweiröhriger, je dreispuriger, 4 km langer Tunnel zu erstellen. Der lichte Tunnelquerschnitt beträgt 185 m², der Axabstand der beiden Röhren 54 m.

In einer ersten Phase wird ein Pilotstollen von 10 m² Querschnitt erstellt. Er folgt der Tunnelaxe der voraussichtlich in einer späteren Phase zu bauenden zweiten Tunnelröhre.

Die *geologischen* Verhältnisse längs des Tunneltrassees sind die folgenden: Neben einer *grösseren Verwerfung im östlichen Tunnelvortrieb* stellt die *westliche* Startstrecke in *völlig verwittertem und zersetztem Granit* (Decomposed Granite) das bautechnisch schwierigste Problem dar (Bild 26). Insbesondere waren die vorliegenden Untertagbau-Erfahrungen in dieser geologischen Formation sehr spärlich und wenig aussagekräftig.

Die nachfolgenden Ausführungen befassen sich ausschliesslich mit dem Durchörtern dieser westlichen Startstrecke.

Der Decomposed Granite

Die südafrikanischen Granite sind bedeutend älter als die der Alpen; entsprechend fortgeschrittener ist deshalb auch der stellenweise an oberflächennahen ungestörten Schichten ein-

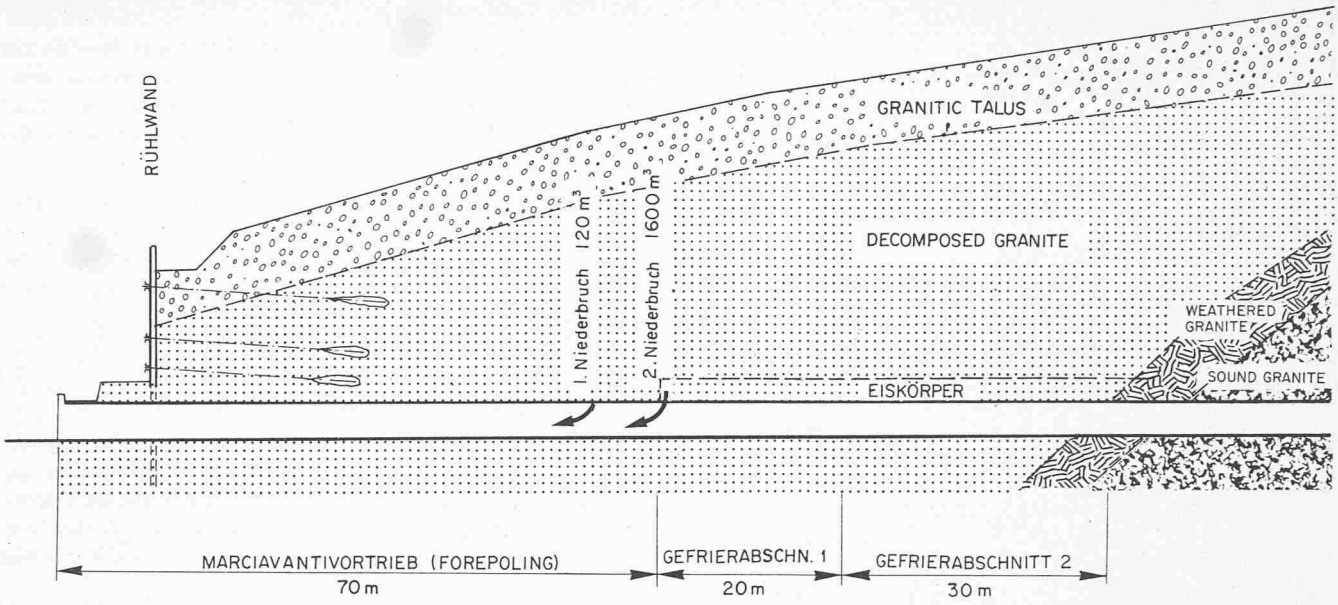
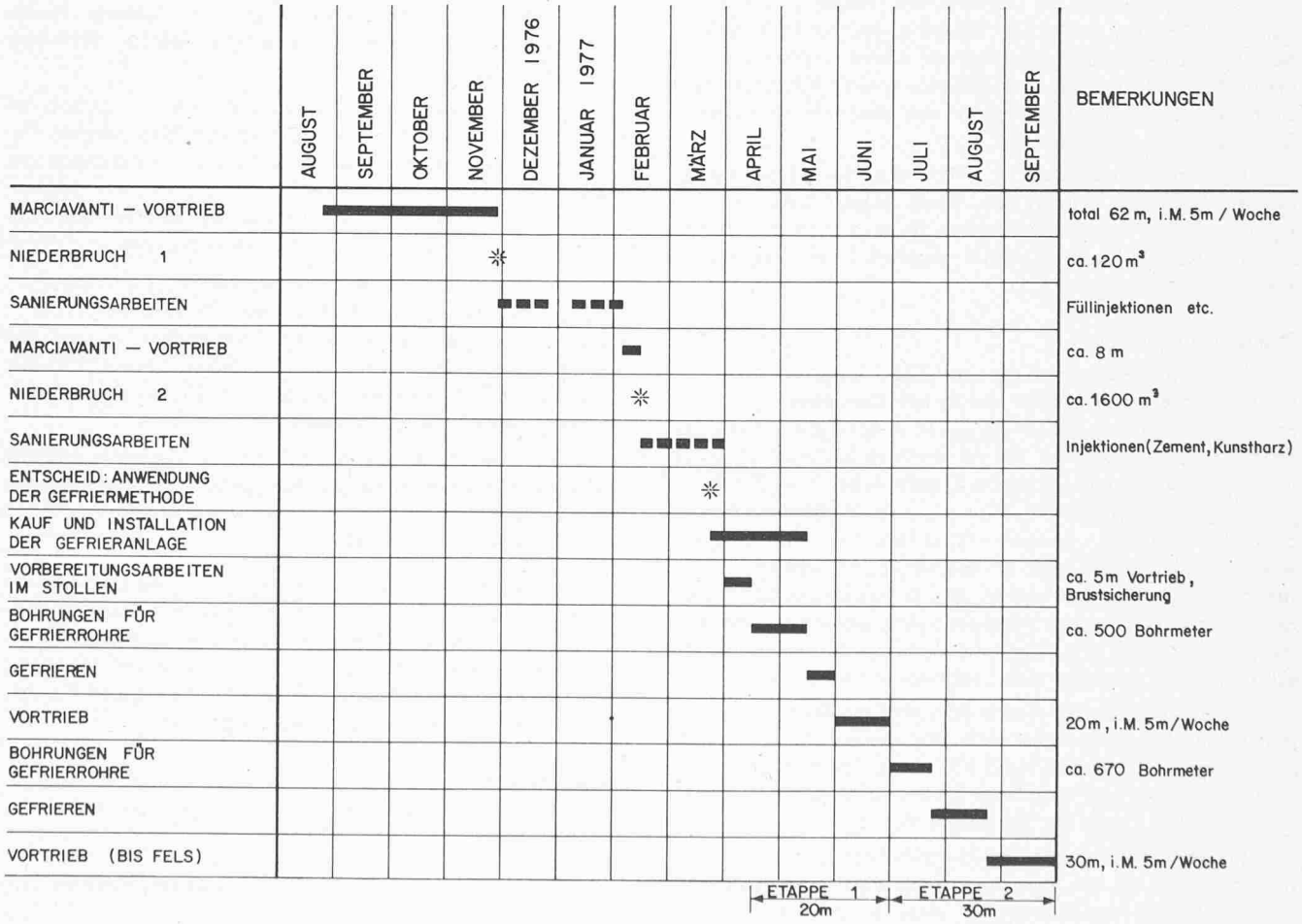


Bild 26. Längsschnitt durch den westlichen Portalbereich (Zone des «Decomposed Granite»

Bild 27. Zeitbedarf für die Ausführung des Pilotstollens im «Decomposed Granite»



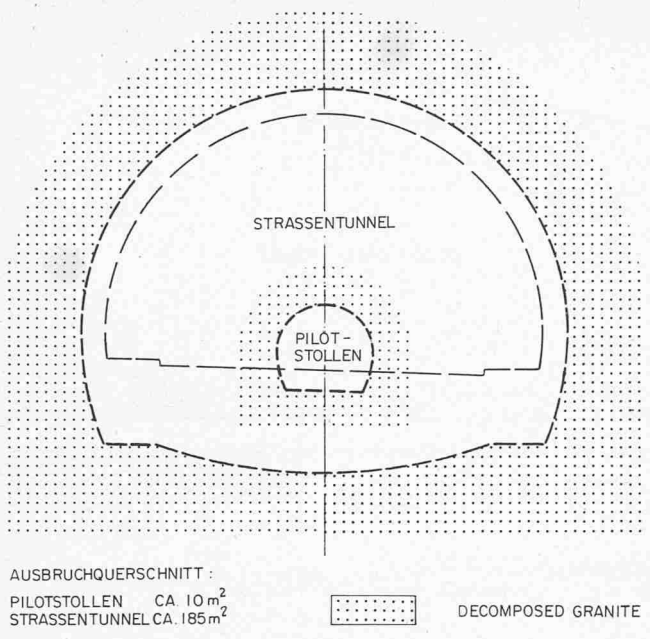


Bild 28. Vergleichender Querschnitt durch den Pilotstollen und den Strassentunnel

getretene Verwitterungs- und Zersetzungsprozess. Durch den langzeitlich verlaufenden chemischen Zersetzungsprozess *wandelte sich der im Granit enthaltene Feldspat in Kaolin um.* Die Quarzkörner blieben unverändert. Die ursprünglich im Granit entstandene *Klüftung ist erhalten geblieben.* Von der Struktur her ist der trockene, ungestörte Decomposed Granite visuell vom unverwitterten Granit praktisch nicht zu unterscheiden.

Der *Wassergehalt* des Decomposed Granite ist *sehr unterschiedlich.* Er liegt auf dieser Baustelle bei rund 20 Prozent. Sehr klein ist die Durchlässigkeit mit einem K-Wert von 10^{-6} bis 10^{-8} cm/s. In den bis zu Millimeter grossen Kluftöffnungen ist im Bereich des Tunnel-Westportales stehendes oder laminar fliessendes Wasser vorhanden.

Das erdbaumechanische Verhalten des Decomposed Granite kann mit dem in den Alpen anzutreffenden *zuckerförmigen Dolomit* verglichen werden. Im trockenen, ungestörten Zustand ist das Material relativ standfest (z. B. Neigung bei Strassenböschungen bis 5:1).

Bau des Pilotstollens

Der Pilotstollen durch die rund 120 m lange Decomposed-Granite-Zone wurde mit der bewährten *Marciavanti-Vortriebsmethode* und *leichter Brustsicherung* in Angriff genommen. Der *relativ hohe Wassergehalt,* die im feuchten Material *nicht vorhandene Kohäsion* und die *grosse Empfindlichkeit auf Erschütterungen* – zum Beispiel beim Eintreiben der Marciavanti – verursachten laufend *kleinere Niederbrüche.* Hauptsächlich wurden solche Ablösungen im Bereich der natürlichen wasserführenden Klüftung beobachtet. Mit konsequent ausgeführten, der Stollenbrust 5–10 m vorauseilenden, ausserhalb des Profiles angeordneten Drainagebohrungen zur Entwässerung der Klüfte konnte nur lokal eine Verbesserung erzielt werden.

Bei Tunnelmeter 62 wurde eine *gestörte Zone* angeschnitten. Innert Minuten ergoss sich eine *breiige Wasser-Decomposed-Granite-Masse* von rund 120 m³ in den Stollen. Ein erneuter Einbruch von rund 1600 m³ einige Meter weiter zeigte Auswirkungen bis an die Terrainoberfläche.

Im Blick auf den Bau des Haupttunnels war es erforderlich, mit auch für das grosse Ausbruchprofil geeigneten Baumethoden Erfahrungen in diesem Material zu sammeln.

Wahl der Gefriermethode

Eine vergleichende Studie über Injektions-, Schild- und Gefrierverfahren wies eindeutig auf eine Vortriebsart *unter einem Frostkörpergewölbe* hin, als die bautechnisch, terminlich und insbesondere auch finanziell günstigste Lösung für den Haupttunnel.

Im Interesse einer möglichst raschen und kontinuierlichen Fortführung der Arbeiten auf der Baustelle wurden mit Hilfe eines Beraters einer spezialisierten Firma die erforderlichen Gefrierinstallationen für die Frostkörperherstellung innerhalb weniger Wochen in Südafrika aus Industrieanlagen zusammengestellt und auf der Baustelle zusammengebaut. Die Gefrieranlage hat eine Leistung von 2×90000 kcal bei —31 °C. Als Gefrierflüssigkeit kam *Kalziumchlorid* zur Anwendung.

Die noch auszubrechende Stollenstrecke bis zum gesunden Granit ist in zwei Gefrierabschnitte von 20 bzw. 30 m aufgeteilt worden. Alle längs des Stollens angeordneten Gefrierbohrungen, Durchmesser 110 mm, und die vier Temperaturmesslöcher wurden mit einem transportablen Deflektometer vermessen.

Nach rund zweiwöchiger Gefrierzeit hatte sich jeweils ein 1,5–2,5 m dicker Eiskörper mit Temperaturen bis zu —15 °C um bzw. teilweise auch innerhalb des Stollenprofiles gebildet.

Die manuellen Ausbrucharbeiten waren wegen des plastischen zähen Verhaltens des gefrorenen Materials sehr mühsam. Aus Platz- und Termingründen war die erwünschte versuchsweise Verwendung eines mechanischen Abbaugerätes nicht realisierbar (Bild 27).

Schlussfolgerungen und Erfahrungen für den Haupttunnel

Für das grosse Haupttunnelprofil von etwa 185 m² Ausbruchquerschnitt müssen insbesondere folgende, beim Bau des Pilotstollens festgestellte, aber wegen des kleinen Profils (Bild 28) zum Teil nicht ins Gewicht fallende Probleme besonders beachtet werden.

1. Der Gefahr von hydraulischen Grundbrüchen im Sohlenbereich muss durch entsprechende Massnahmen begegnet werden. Als Minimallösung ist die Verwendung von Vakuumlanzen zur Wasserdruckreduktion in den Klüften (entsprechende Tests sind noch auszuwerten) und als Maximallösung ist das Gefrieren der ganzen Sohle ins Auge zu fassen.

2. Auf die Standsicherheit der Tunnelbrust muss besonders geachtet werden (z. B. Abbau des Porenwasserdruckes). Während des Vortriebs muss die Tunnelbrust so steil wie möglich ausgebildet werden, um in jedem Querschnitt die Zeitspanne zwischen Ausbruchbeginn und Erreichen des Sohlschlusses möglichst klein zu halten.

3. Für den Ausbruch des gefrorenen Materials und die Profilierungsarbeiten ist ein mechanisches Ausbruchverfahren (z. B. Teilschnittmaschine) zu verwenden, um ansprechende Vortriebsleistungen zu erzielen.

Zur Beschaffung der notwendigen Grunddaten für die Bemessung des Frostkörpers für den Bau des Haupttunnels wurde ein umfangreiches Untersuchungsprogramm angeordnet. Die Tests werden durch Van Niekerk, Kleyn und Edwards, dem südafrikanischen Partner für den Du-Toitskloof-Tunnel, im Labor der Universität Kapstadt ausgeführt.

Literaturverzeichnis

[1] *Kovari K.*: «Ein Beitrag zur Bemessung von Untertagebauten.» Schweiz. Bauzeitung, Heft 9, 1969.

Adresse der Verfasser: Elektrowatt Ingenieurunternehmung AG, Bellerivestr. 36, 8022 Zürich.