

Mobile Kältesysteme erfolgreich im Einsatz

Moderner Tunnelbau nutzt Kältetechnik zur Baugrundvereisung

Benno Müller, München, Kai Selmer, Mannheim

Vor dem Hintergrund der Fußball-WM 2006 und dem Neubau der Allianz Arena in Fröttmaning zählt die Bahnsteigerweiterung am U-Bahnhof Marienplatz zu den wichtigsten Bauvorhaben in München. Bis 2006 sollen zwei zusätzliche Tunnel die Bahnsteige auf die doppelte Fläche vergrößern. Ein neuer galerieartiger Verbindungsgang soll zudem die Fahrgastströme von U- und S-Bahn wirksam entflechten. Für diese Baumaßnahmen wurde ein völlig neues Kältesystem verwirklicht, um Erdreich großflächig aufzufrieren.

Gemeinsam mit der York Deutschland GmbH entwickelte das Bauunternehmen Max Bögl mit seinem Fachbereich für Bodengefriertechnik eine Kälteanlage, mit der es möglich ist, große Bodenkubaturen aufzufrieren und für die Dauer einer Baumaßnahme im gefrorenen Zustand zu halten. Der gefrorene Boden dient dabei als ein statisches und gegen das anstehende Grundwasser dichtendes Element. Beeinträchtigungen des Baugrundes durch Injektionen, Verpressungen oder Verfüllungen wurden durch diese temporäre und umweltfreundliche Maßnahme vermieden.

Grundwasser bereitet Probleme

Entscheidend bei den bergmännischen Arbeiten für diese beiden Paralleltunnel unter dem Rathaus ist die Beherrschung der örtlichen vorliegenden Baugrund- und Grundwasserverhältnisse. Diese stellen sich wie folgt dar: Zuerst stehen, teilweise als Auffüllung, mit einer Höhe von zwei bis fünf Metern sandige Fein- bis Grobkiese des Quartärs an. Ein geschlossener Grundwasserhorizont fehlt in diesem Bereich als eine örtliche Besonderheit völlig. Lediglich mit einzelnen Quartärwässern infolge versickernder Niederschläge war zu rechnen.

In den darunter liegenden, Grundwasser stauenden tertiären Schluffen und Tonen sind zwei mit 7,5 bis 12 Metern sehr mächtige und örtlich auch geringmächtige Schichten aus teilweise schluffigen feins bis Mittelsande eingelagert. Sie führen gespanntes Grundwasser. Die Grenzen zwischen diesen Schichten schwanken stark, bereichsweise um bis zu sieben Metern. So kommen die Firsten der neuen Erweiterungstunnel überwiegend in Schluff- und Tonschichten, örtlich aber auch in der oberen Tertiärsandschicht zu liegen. Von den Sohlen der Vortriebe wird fast überall die untere tertiäre Sandschicht angeschnitten.



U-Bahnhof Marienplatz mit den beiden Erweiterungstunneln und Startschächten für die bergmännischen Vortriebe

zu den Autoren

Benno Müller,
Leiter Bodengefriertechnik,
Max Bögl
Bauunternehmung
GmbH & CO. KG,
München



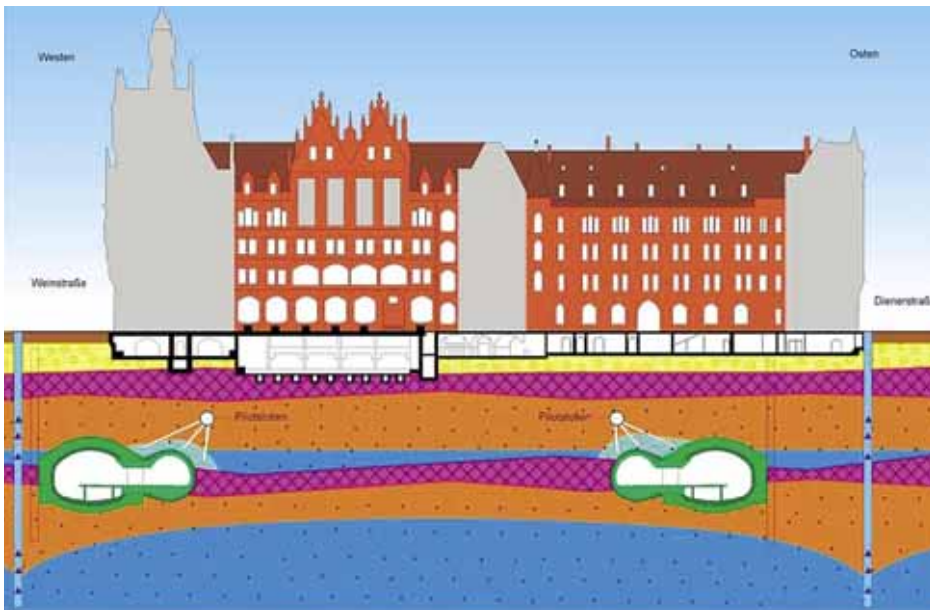
Kai Selmer,
Leiter Unternehmensbereich
Industriekälte, York
Deutschland GmbH,
Flensburg



Weitere Schwierigkeiten vor Ort

Das gesamte Rathaus, einschließlich der Innenhöfe, ist vollständig unterkellert. Wasserhaltungsmaßnahmen von Obertage aus sind daher in diesem Bereich nicht möglich. Auch mit Brunnenbohrungen von den umliegenden Straßen und Plätzen aus war das Grundwasser im Baubereich allein nicht zu beherrschen, da die beiden vorhandenen U-Bahntunnel und die Schlitzwände des Verkehrsbauwerkes Marienplatz und des Zugangsbauwerkes in der Landschaftstraße deren Wirkungskreis einschränken würden.

Eine weitere Erschwernis bei den Baumaßnahmen stellten die für die früheren Tunnelvortriebe ausgeführten und bis etwa 32 m unter Gelände reichenden Grundwasserabsenkbrunnen dar. Sie wurden durch alle tertiären Grundwasserhorizonte



U-Bahnhof mit Erweiterungstunneln, Pilotstollen und Vereisungskappen

hindurch verfiltert und stellen so hydraulische Kurzschlüsse zwischen den verschiedenen Sandhorizonten dar. Beim Rückbau nach früheren Bauarbeiten wurden diese Brunnen nur verfüllt, so dass diese künstlichen Verbindungen bis heute weiter bestehen. Durch Umbaumaßnahmen in den Höfen des Rathauses und neu verlegte Versorgungsleitungen in der Diener- und Weinstraße sind diese Brunnenbohrungen heute nicht mehr auffindbar.

Die Lösung: Baugrundvereisung

Die Ausschreibung für das Bauvorhaben wurde im Januar 2003 durchgeführt, die Vergabe erfolgte im Mai 2003 an die Firma Max Bögl. Dabei wurden drei Sondervorschläge beauftragt. Der Hauptsondervorschlag sah vor, das Restwasser im ersten Tertiärstockwerk, das durch die Vertikalbrunnen nicht abgesenkt werden kann, durch eine Baugrundvereisung zu beherrschen, die gleichzeitig die Funktion der Voraussicherung der ca. 100 m langen Vortriebe übernimmt.



Vorpressen der Stahlbetonrohre

Die Geometrie des Frostkörpers ergab sich aus dem Verlauf der Tunnelfirste, den Anschlussbereichen an den Bestand, der Mindestdicke und der Anordnung der Vereisungsbohrungen. Die Festlegung der Vereisungsbohrungen war der Kernpunkt des Sondervorschlages. Ausgeführt wurden zwei Pilotstollen jeweils über den Haupttunneln, von denen aus fächerförmig relativ kurze Vereisungsbohrungen abgeteufelt werden konnten.

Die 100 Meter langen Pilotstollen wurden von den beiden Startschächten als Rohrvortrieb DN2000 mit einem Drucklufthaubenschild und Stahlbetonrohren hergestellt.

Nach dem Andocken des Schildes an die Schlitzwand wurde die Stirnseite abgedichtet, die Druckluftstützung abgestellt und die Schildinnereien rückgebaut. Der Schildmantel verblieb im Boden. Bei der zweiten Schildfahrt wurde ein zweiter Schildmantel eingesetzt, der ebenfalls im Boden verblieb. Beide Rohrvortriebe verliefen problemlos, das gefürchtete Antreffen von alten Bohrungen fand nicht statt.

Wie die Vereisung funktioniert

Im nächsten Schritt wurden die Vereisungsbohrungen hergestellt. Geplant waren Spülbohrungen mit einem Durchmesser von 88,9 mm. Aufgrund der obersten Priorität einer setzungsarmen Bauweise wurde nach Diskussion mit allen Beteiligten das Dickspülverfahren angewandt. Die Stahlbetonrohre der Pilotstollen wurden mit Kernbohrungen perforiert und die Bohrungen über Preventer gegen das an-



Rohrleitungen und Gefrierköpfe im Pilotstollen: Vor und während der Vereisung

stehende Grundwasser hergestellt. Die Bohrrohre verblieben als „Vereisungsrohre“ im Boden. Das Bohrloch tiefste wurde nach Erreichen der Endteufe abgedichtet und jede Bohrung nach einer Druckprobe für den Einbau der Solespeiseröhre freigegeben. Insgesamt handelte es sich um 654 Bohrungen mit einer Gesamtlänge von 3990 m. Aufgrund der relativ kurzen Bohrlängen von 3 bis 10 Metern konnte die Bohrtoleranz von 1,5% problemlos eingehalten werden. Parallel zu den Bohrarbeiten erfolgte der Anlagenbau der Bodengefrierung.

Die Kälteanlage

Für ca. 5000 m² zu gefrierenden Boden kamen zwei neu entwickelte mobile Kälteanlagen von York zum Einsatz, jede mit einer Kälteleistung von 275 kW. Hierbei handelt es sich um zwei Kohlendioxid-Am-

moniak-Kaskadenanlagen, die jeweils in einem Container mit 12 x 2,5 m und knapp 3 m Höhe untergebracht sind. Der Vorteil besteht darin, dass keine weiteren Lärmschutzmaßnahmen getroffen werden müssen. Jeder dieser beiden Containereinheiten ist eine eigenständige Gefrierereinheit mit allen für eine Bodengefrierung notwendigen Anlagenkomponenten.

Als Kälteüberträger kam ein CaCl₂-Wassergemisch zum Einsatz, das bis auf -38 °C herunter gekühlt wurde. Die 700 laufenden Meter hochwertig isolierten Vor- und Rücklaufleitungen waren auf einen maximalen Durchfluss von 200 m³ Sole pro Stunde ausgelegt. Insgesamt mussten in beiden Pilotstollen 350 Gefrierköpfe montiert und an die Rohrleitung angeschlossen werden.

Zur Überwachung des Frostkörperaufbaus und der Erhaltungsphase wurden dreißig Temperaturmessbohrungen mit

rund 180 Temperaturmessfühlern bestückt. Siebzig Temperaturmessfühler dienten zur Überwachung der Soletemperatur in den einzelnen Solekreisläufen. Die Fernsteuerung und Überwachung wurden über das firmeneigene Intranet mit Störmeldung durch E-Mail und SMS aufgebaut. Eine umfangreiche Visualisierungstechnik diente zur Darstellung der Messergebnisse, beziehungsweise zur Steuerung des Frostkörpers einschließlich des Nachweises für die Vortriebsvorausschau.

An der Geländeroberfläche bzw. an der Bebauung wurden 130 Stück Oberflächennivellementbolzen gesetzt, die in den kritischen Phasen regelmäßig gemessen wurden. In den Kellerräumen des Rathauses war ein Schlauchwaagensystem mit zehn Messstellen installiert, das online mit der TU München verbunden war. Alle Netzsysteme wurden ständig miteinander abgeglichen.

Die beiden Gefrieranlagen auf dem Marienhof



Vereisungstests im Labor

Im Vorfeld der Vereisungsmaßnahme gab es umfangreiche Laboruntersuchungen an den Universitäten Québec und München an dem Werkstoff „gefrorener Boden“, um speziell im Frosthaltebetrieb ein Minimum an Frosthebungen zu erreichen. Beim Gefrieren des Bodens wird nämlich ein Teil des Porenwassers gefroren. Mit der Zustandsänderung von Wasser zu Eis ist eine Volumenvergrößerung des Porenwassers um 9% verbunden. Zusätzlich diffundiert bei frostempfindlichen Böden durch einen Unterdruck an der Gefrierfront Wasser in die Grenzschicht und kann die so genannte „Eislinse“ bilden. Beide Effekte sind für die Frosthebungen verantwortlich. Durch Oszillieren der Gefrierfront und Minimierung der Frostkörperhaltezeit kann der Einfluss der Eislinsebildung deutlich zurückgedrängt werden.

Vortrieb im „Eistunnel“

Nach dem Auffahren der Pilotstollen und dem Herstellen der Vereisungsbohrungen wurden die beiden Startschächte bis Unterkante Ausbruch der Bahnsteigerweiterungstunnel weiter abgeteuft. In vier Teilphasen erfolgte der Einbau eines Stahlbetonabfängerahmens in die überschnittenen Bohrpfähle der Schachtwandung im Bereich des Anstiches. Anschließend wurden innerhalb des Abfängerahmens die teils bewehrten, teils unbewehrten Bohrpfähle mit einem Durchmesser von 1200 mm ausgebrochen und die Ortsbrust mit Spritzbeton gesichert. Voraussetzung dafür war der Nachweis des planmäßig aufgefrorenen Frostkörpers.

Wie im Münchner U-Bahnbau üblich erfolgte der Spritzbetonvortrieb als Vollausbruch mit kurz voreilender Kalotte. Der



Profilieren des gefrorenen Bodens im Kalottenbereich

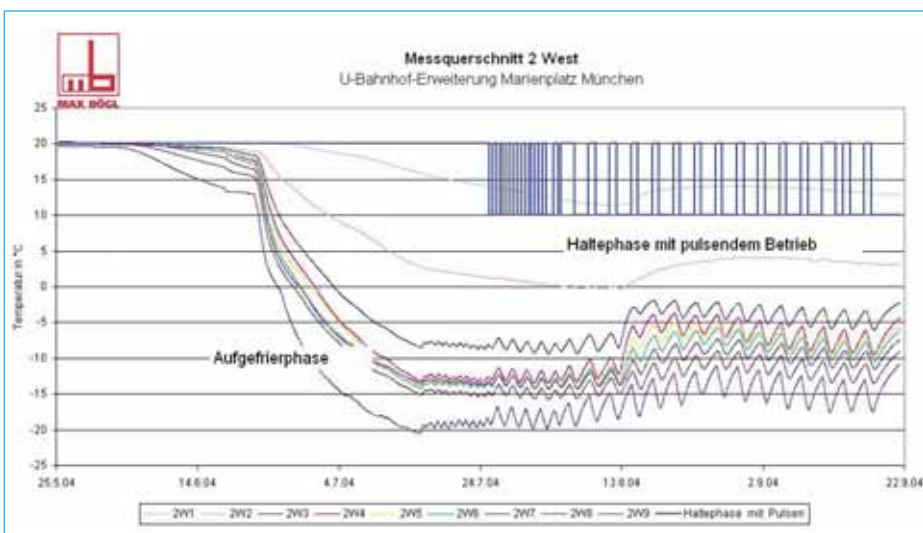
Ausbruchquerschnitt beträgt 55 m². Die Abschlagslänge lag in der Kalotte bei 1m, in Strosse und Sohle bei 2 m. Die Spritzbetonstärke betrug statisch 30 cm, wobei in der Kalotte im Bereich des Kontaktes zum Eisdach mit 3 cm eine so genannte „Opferschicht“ zugegeben wurde. Als Ausbaubögen wurden 4-Gurt Trapezgitterbögen in der Kalotte eingebaut und die Spritzbetonschale beiderseits mit Q 188 und Zulage Q 177 in Ulme und Sohle bewehrt.

Da die Voraussicherungen durch die Bodenvereisung vor Vortriebsbeginn schon bestanden, war ein schnellerer Vortrieb möglich, der aus tunnelbautechnischer Sicht Vorteile hatte. Der Ausbruch erfolgte mit einem Tunnelbagger und An-

baufräse. Als Spritzbeton wurde ofentrockene Siloware verwendet. Die Vortriebsarbeiten wurden Ende November 2004 erfolgreich abgeschlossen, das Abfahren von fünf alten Brunnen- und fünf Pegelbohrungen dank des Eisdaches problemlos bewältigt. Die Vereisung konnte nach Erreichen der notwendigen Spritzbetonfestigkeit sukzessive abgeschaltet werden. Im Tunnel Weinstraße wurden bereits die Durchbrucharbeiten begonnen. Insgesamt müssen zirka 1500 m² Stahlbeton mit Seilsägen abschnittsweise entfernt und durch insgesamt 22 Abfängerahmen ersetzt werden.

Ein Verfahren mit Zukunft

York Deutschland und die Firmengruppe Max Bögl sehen eine große Zukunft für den Vereisungsprozess bei hydrogeologischen schwierigen Bauaufgaben. Durch die innovative Anlagentechnik wird dieses Sonderverfahren im Tiefbau einen wachsenden Stellenwert gewinnen. Das Verfahren ist in mehrfacher Hinsicht überaus wirtschaftlich. Auf der einen Seite spart es den Betreibern Zeit und Geld, auf der anderen Seite wird das Risiko der Beschädigung umliegender Gebäude verringert. Der nächste Einsatzort der Anlagen wird voraussichtlich Berlin sein. Dort ist ein weiteres Bauprojekt an einer U-Bahn geplant. Vergleichbare York-Containeranlagen werden zurzeit bei Projekten in Wien und ab 2006 auch in Köln eingesetzt. ■



Temperaturverlauf einer Temperaturmesskette