Anlage 2
Blatt 1 bis 5

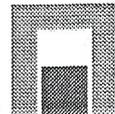
Ergebnisse der radiohydrometrischen Versuche

Es wurden an zwei Stellen des Projektgebietes radiohydrometrische Versuche zur Bestimmung der Fließrichtung und der Strömungsgeschwindigkeit des Grundwassers ausgeführt. Die Messungen wurden innerhalb der Bohrlöcher jeweils in 1 m-Abständen vorgenommen, so daß auch die über die Bohrlochlänge wechselnden Verhältnisse erfaßt wurden. Nachfolgend werden die Ergebnisse der Versuche zusammenfassend beschrieben und auf die verschiedenen Möglichkeiten eingegangen, über dem Tunnel in der Innenstadt ein Hilfsgewölbe herzustellen, wie es bereits in der Studie erwähnt wurde.

1. Situation an der Kreuzung Emslandstraße/Prinzenweg mit der B 2

Das Bohrloch B 107 liegt westlich, das Bohrloch B 111 östlich der B 2. Beide Bohrlöcher sind ca. 80 m voneinander entfernt. Die Fließrichtungen in beiden Bohrlöchern sind entgegengesetzt. Nach den Messungen in B 107 strömt das Grundwasser in Richtung Südosten zum See, in B 111 in Richtung Nordwesten zum Siebenquellental.

Die gemessenen Filtergeschwindigkeiten bewegen sich zwischen 0,12 und 3,94 m/d; die errechneten Strömungsgeschwindigkeiten des Grundwassers liegen damit zwischen ca. 0,6 und ca. 20 m/d. Der Ermittlung der Strömungsgeschwindigkeiten liegt eine Porenzahl von $n = 0,2$ zugrunde, die für die vorliegenden Böden nicht ermittelt wurde, in ihrer Größenordnung jedoch zutreffen dürfte. Auch bei Annahme wechselnder Porenzahlen ergeben sich stark wechselnde Fließgeschwindigkeiten. Die Meßergebnisse geben die Verhältnisse des wechselhaft aufgebauten Untergrundes wider. Abhängig vom Anteil der bin-



- 2 -

digen Bestandteile über die Höhe stellen sich stark unterschiedliche Fließgeschwindigkeiten ein. Auch bei der Fließrichtung des Grundwassers wirken sich lokale Einflüsse im Bodenaufbau aus. Richtung, Mächtigkeit und Geschwindigkeit des Grundwasserstroms sind entlang der geplanten Trasse nicht einheitlich.

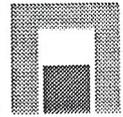
Diese Ergebnisse sprechen deshalb auch für die in der Studie empfohlene Grundwasserhaltung mittels Druckluft. Die Anordnung von Brunnen entlang der Trasse führt nicht zuverlässig zu der gewünschten Absenkung oder Absperrung des Grundwasserstroms, wenn die Fließrichtungen wechseln bzw. das Grundwasser auf der Oberkante bindiger, wasserstauer Schichten fließt. Bei dem vom Westportal aus mit 3,5 % fallenden Vortrieb wäre deshalb mit ständigem Wasserandrang an der Ortsbrust zu rechnen.

2. Situation an der Kreuzung Hanfelder Straße/Georgenbach

Zu deutlich unterschiedlichen Ergebnissen führten auch die Messungen in den Bohrlöchern B 104 östlich und B 105/105 a westlich der Hanfelder Straße.

Beim Bohrloch B 104 fließt das Grundwasser in 5 - 12 m Tiefe in westlicher Richtung entgegen der Fließrichtung des Georgenbachs.

Bei Bohrloch B 105 a ergibt sich in 8 - 11 m Tiefe eine zu B 104 vergleichbare Fließrichtung. Bei den nur oberflächennahen Messungen in B 105 in 4,5 ./ 5,5 m Tiefe ergibt sich eine Fließrichtung in Richtung Westen, d. h. etwa parallel zu der des Georgenbachs. Eine eindeutige Begründung für diesen Sachverhalt läßt sich aus dem jetzigen Kenntnisstand der Untergrundverhältnisse noch nicht geben. Es können sich hier sowohl großräumige Grundwasserbewegungen als auch lokale Grundwasserentnahmen oder Einleitungen



- 3 -

auswirken, oder die stauende Wirkung einzelner Linsen aus bindigen, weniger durchlässigem Material, wie es mit der Bohrung B 105 a in der fluvial aufgefüllten Rinne entlang des Georgenbachs auch erbohrt wurde.

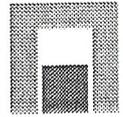
Die gemessenen Fließgeschwindigkeiten schwanken entsprechend den in unterschiedlichen Tiefen vorhandenen bindigen Bodenanteilen zwischen 0,08 (B 105) und 1,35 m/d (B 104). Bei einer angenommenen Porenzahl von $n = 0,2$ schwanken die Grundwassergeschwindigkeiten in einem weiten Bereich zwischen 0,4 und 6,8 m/d.

3. Verfahren zur Herstellung eines Hilfsgewölbes über dem Tunnel

3.1 Anmerkungen zum Gefrierverfahren

Bei Vereisungen wird die Einsatzgrenze des Verfahrens häufig bei Strömungsgeschwindigkeiten von 1-3 m/d gezogen. Im vorliegenden Falle wäre theoretisch denkbar, durch Anordnung einzelner Brunnen und Umpumpen des Grundwassers die Fließgeschwindigkeiten lokal soweit abzusenken, bis ein dichter Vereisungskörper aufgebaut ist. Solche Maßnahmen erfordern jedoch eine äußerst genaue Erkundung der hydrogeologischen Verhältnisse, um keine Lücken im Vereisungskörper offen zu lassen und sind zudem kostenaufwendig.

Außerdem ist davon auszugehen, daß die Herstellung des Vereisungskörpers durch Schockgefrieren mittels Stickstoff hergestellt werden muß, während die Stabilisierung des Vereisungskörpers sowohl durch intervallartiges Gefrieren mittels Stickstoff als auch durch Dauerfrost mittels Sole erfolgen kann. Die Entscheidung hierüber ergibt sich letztendlich aus der erforderlichen Dauer, wie lange die einzelnen Vereisungsabschnitte aufrechterhalten werden müssen.



- 4 -

Die Kosten der Vereisungen schwanken sehr stark in Abhängigkeit von den örtlichen Verhältnissen. Auch bei günstigen Verhältnissen sind Injektionen in der Regel deutlich billiger, zumal die Voraussetzungen für eine Vereisung in Starnberg als eher aufwendig einzuschätzen sind und der Umfang der Maßnahme sehr groß ist.

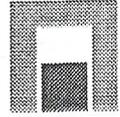
3.2 Anmerkungen zu den Injektionsverfahren

Auch bei einer Entscheidung zugunsten einer Abdeckung aus Injektionen über dem Tunnel muß die hydrogeologische Modellvorstellung des innerstädtischen Tunnelabschnittes bei den weiteren Planungsschritten verbessert werden. Die Zusammensetzung des Injektionsmaterials sowie der gesamte Bauablauf ist auf den uneinheitlichen Bodenaufbau entlang der Tunneltrasse abzustimmen.

Von den verschiedenen Injektionsverfahren können für den Tunnel Starnberg wegen des anstehenden Grundwassers voraussichtlich nur Zementinjektionen zur Anwendung kommen. Eine eventuelle Beeinflussung des PH-Wertes ist durch entsprechende Vorversuche zu klären bzw. während der Injektionsarbeiten durch Pegel zu überprüfen.

Als in wasserrechtlicher Hinsicht unbedenklich können auch Hochdruckinjektionen angesehen werden, die allerdings teurer sind als einfache Zementinjektionen.

Injektionen mit Wasserglas stoßen zumindest bei größeren Mengen auf Bedenken in wasserwirtschaftlicher Hinsicht. Bei Verwendung von organischen Härtern ist die Reaktion mit der Gelbildung noch nicht abgeschlossen, vielmehr können auch danach mögliche Absonderungen zu einer Langzeitbelastung des Grundwassers führen.



- 5 -

Bei der Verwendung von organischen Härtern (Joosten-Verfahren) wird dieser Nachteil zwar weitgehend ausgeschlossen, wegen der hohen Viskosität der verwendeten Lösungen wird die Anwendung dieses Verfahrens meist auf Grob- bis Mittelsande beschränkt und ist für die anstehenden Kiese weniger geeignet.

Eine neuere Entwicklung zur Herstellung großvolumiger Verpreßkörper ist die Verwendung von Polyurethanen.

Dieses Verfahren stammt ursprünglich aus dem Bergbau, wurde jedoch auch bereits verschiedentlich im oberflächennahen Tunnelbau praktiziert. Nachteilig sind die zur Zeit noch hohen Kosten dieses Verfahrens. Bei einem Porenvolumen von 20 bis 30 % des anstehenden Bodens ist dieses Verfahren jedoch noch teurer. Hinsichtlich des Einsatzes von Polyurethanen im Grundwasser liegen noch wenig Erfahrungen vor. Nach unseren Erkundigungen gibt es jedoch noch keine allgemeine Zulassung bzw. besteht noch keine generelle Unbedenklichkeit in wasserwirtschaftlicher Hinsicht.