Zeitschrift: Bulletin für angewandte Geologie

Herausgeber: Schweizerische Vereinigung der Petroleum-Geologen und –Ingenieure; Schweizerische Fachgruppe für Ingenieur-Geologie

Band: 4 (1999)

Heft: 1

Artikel: Die Transportleitung Hardhof-Lyren der Wasserversorgung Zürich : ein geologisch anspruchsvoller Stollenbau im dicht besiedelten Stadtgebiet

Autor: Mützenberg, Stefan

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-221504

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: 05.12.2025

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

Bull. angew. Geol.	Vol. 4	Nr. 1	51 -66	Juli 1999

Die Transportleitung Hardhof – Lyren der Wasserversorgung Zürich Ein geologisch anspruchsvoller Stollenbau im dicht besiedelten Stadtgebiet

mit 5 Figuren

STEFAN MÜTZENBERG*

Zusammenfassung

Die Transportleitung Hardhof – Lyren der Wasserversorgung Zürich als wichtiger Grundpfeiler für die Trinkwasserversorgung der Stadt Zürich unterquert das dicht besiedelte Limmattal von Zürich-Höngg bis Zürich-Altstetten. Beim Bau der Transportleitung stellten nicht nur die zahlreichen heiklen Infrastrukturbauten an der Oberfläche, sondern auch die sehr wechselhaften geologischen Verhältnisse, namentlich grundwassergesättigte Sande und Schotter eine grosse Herausforderung an Geologen, Ingenieure und an die Unternehmung dar. Dank dem Einsatz modernster Vortriebsmethoden und einer voraussichtigen Bauplanung konnte das Bauwerk termingerecht und ohne nennenswerte Schwierigkeiten vollendet werden.
Der vorliegende Artikel zeigt die Probleme in den sehr unterschiedlichen geologischen Schichten, die gewählten Baumethoden für den Stollen und die Schächte und die gewonnenen Erfahrungen.

1. Projekt

Die Transportleitung Hardhof – Lyren ist Teilstück einer grosskalibrigen Trinkwasserleitung, welche als stadtumspannender Ring dereinst die wichtigsten Trinkwasseranlagen der Stadt Zürich verbinden soll. Sie schliesst an den bereits bestehenden Käferbergstollen zwischen dem Seewasserwerk Lengg am rechten Zürichseeufer und dem Grundwasserwerk Hardhof im Limmattal an (Figur 1). Mit dem hier beschriebenen Bauabschnitt Am Wasser – Schacht Lyren wird die Leitung unter dem Limmattal hindurch mit dem Reservoir Lyren verbunden. Eine Erweiterung vom Reservoir Lyren bis zum Seewasserwerk Moos am linken Zürichseeufer wurde vorläufig zurückgestellt.

Die Transportleitung Hardhof – Lyren weist eine Gesamtlänge von rund 3 km und einen Innendurchmesser von 2.05 m auf. Der Systemtiefpunkt liegt in einer Kaverne am Fuss des Schachtes Lyren, rund 120 m unter dem Reservoir Lyren in Altstet-

* Dr. Heinrich Jäckli AG, Limmattalstrasse 289, 8049 Zürich

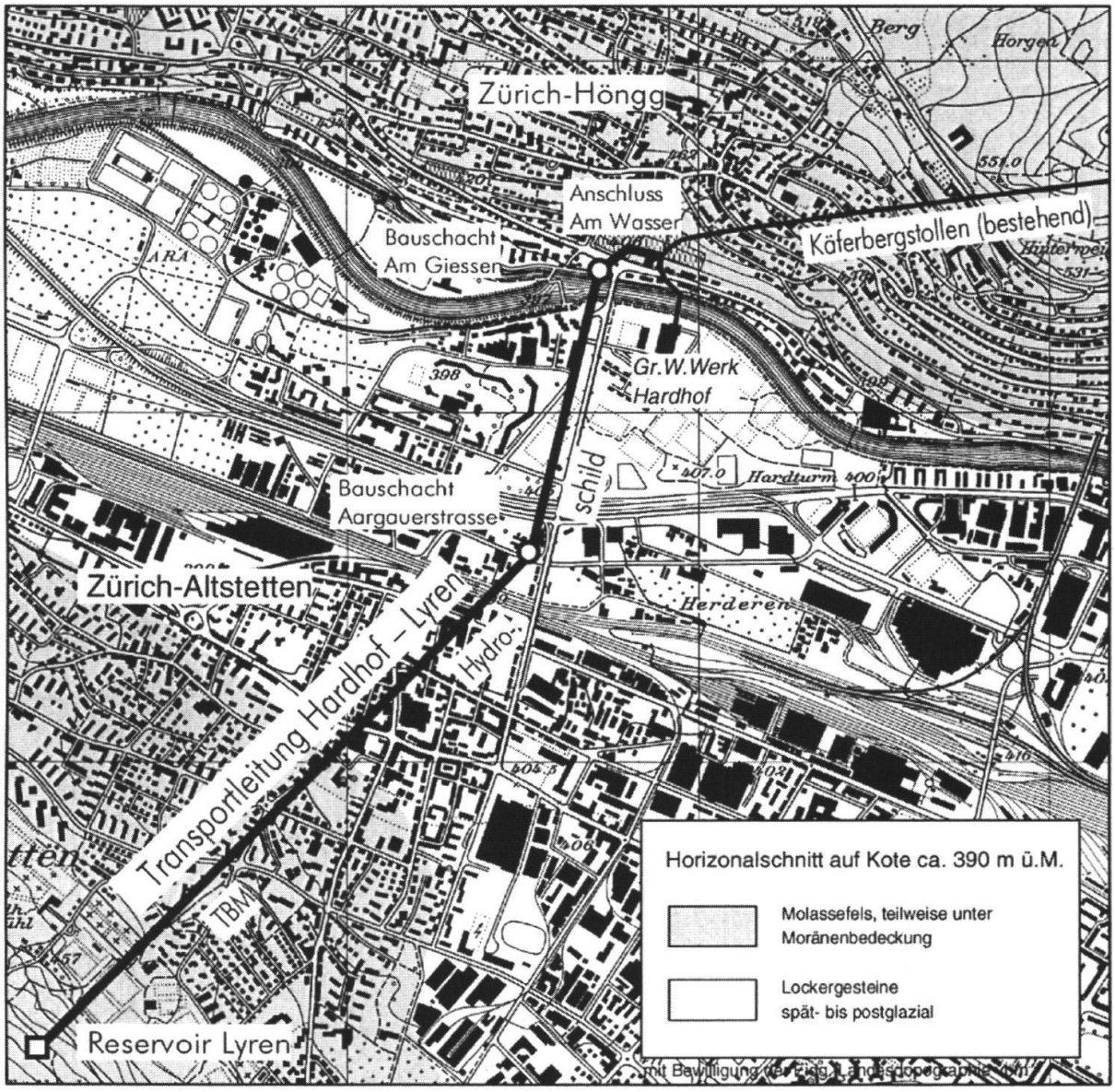


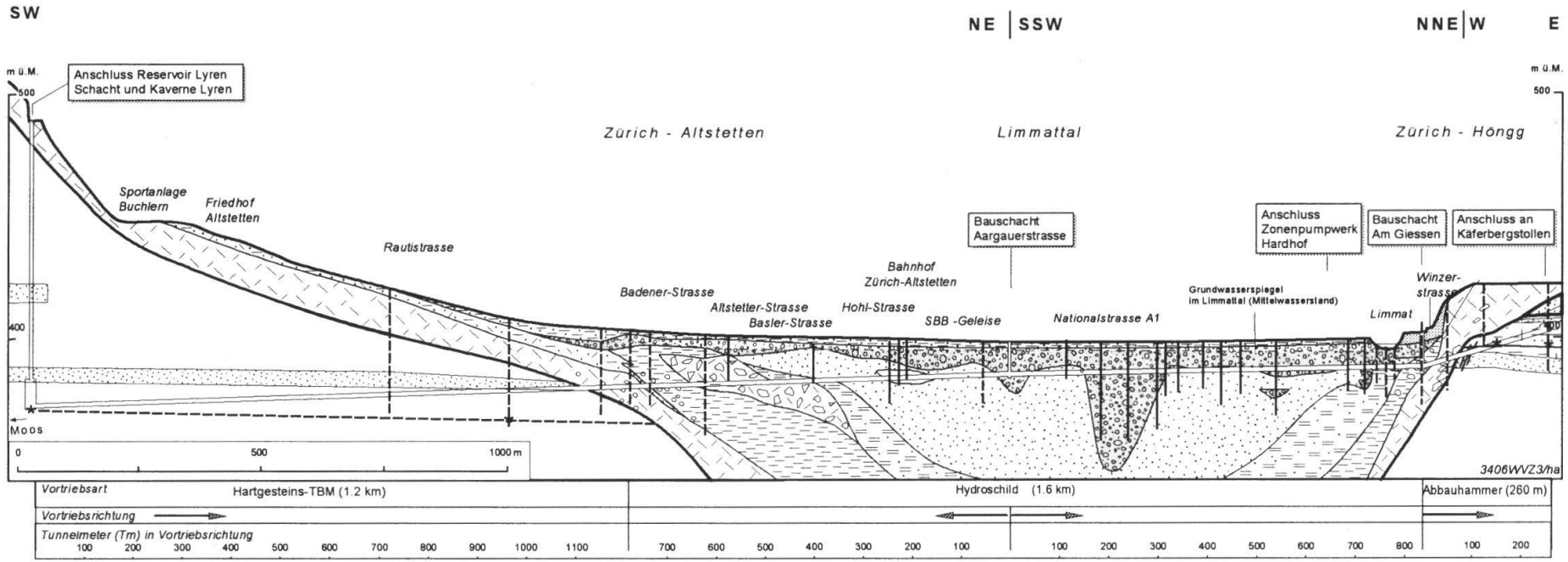
Fig. 1: Transportleitung Hardhof – Lyren und Käferbergstollen, Übersichtsplan 1:25'000. Reproduziert mit Bewilligung des Bundesamtes für Landestopographie vom 8.6.1999.

ten. Von der Kaverne Lyren steigt die Leitung mit einem Gefälle von 3.0 bis 5.5‰ zum nördlichen Talrand des Limmattales beim Hardhof, wo sie beim Anschlussbauwerk "Am Wasser" an den bestehenden Käferbergstollen anschliesst. Die Ausbruch- und Vortriebsarbeiten für den Schacht- und Stollenbau (ohne Rohreinbau und Endausbau) dauerten vom Juni 1994 bis März 1996, also knapp 2 Jahre.

2. Geologie und Hydrogeologie

2.1 Übersicht

Der Stollen Am Wasser – Schacht Lyren verläuft unter den Talflanken beidseits des Limmattales in Mergel- und Sandsteinschichten der Oberen Süsswassermolasse (Figur 2). Die Gesteinsschichten der Molasse fallen hier im Nordschenkel der



Legende:

Lockergesteine:

- Gehängelehm und Überschwemmungssedimente
- Limmattal-Schotter über/unter Grundwasserspiegel
- sandige Delta- und Seeablagerungen
- siltig-sandige Seeablagerungen
- moränenartige Schotter unter dem Grundwasserspiegel
- gletschernahe Seeablagerungen, mit Blöcken
- verschwemmtes Moränenmaterial
- Grundmoräne, mit eingelagerten Molasseschollen

Obere Süsswassermolasse

- Sandstein, Siltstein, Mergel, undifferenziert
- markante Sandsteinschicht
- * Meilener Kalk, Aufschluss

Zeichen

- Sondierbohrung für Transportstollen
- ältere Sondierbohrung, z.T. projiziert

Fig. 2: Geologisches Längenprofil der Transportleitung Hardhof – Lyren.

Uetliberg-Synklinale mit ca. 2° flach nach SE bis SSE ein. Über der Molasse liegt mit einer unterschiedlichen Mächtigkeit Moräne der letzten Eiszeit.

Zwischen Altstetten und dem Bauschacht Am Giessen bei Höngg durchquert der Stollen die Lockergesteinsfüllung des Limmattales. Diese besteht im randlichen Bereich aus älteren, z.T. glazial vorbelasteten Seeablagerungen und gletschernahen Schottern. Darüber folgen nacheiszeitliche, fluvioglaziale und zum Teil limnische Silte und Sande. Über diesen feinkörnigen Ablagerungen erstreckt sich vom Talrand bei Höngg bis ins Gebiet der Badenerstrasse in Altstetten eine spätglaziale Schotterflur mit dem Limmattal-Schotter.

Der gut durchlässige Limmattal-Schotter bildet den Grundwasserleiter für den ergiebigen und intensiv genutzten Grundwasserstrom des Limmattales. Der Stollen verläuft zwischen 8 und 20 m unter dem mittleren Grundwasserspiegel.

2.2 Geologische Untersuchungen

Vor der Erkundung der geologischen und hydrogeologischen Verhältnisse entlang der Transportleitung wurden in einem ersten Schritt frühere geologische Untersuchungen und Sondierungen ausgewertet. Insbesondere im mittleren, dicht überbauten Teil des Limmattales waren bereits zahlreiche ältere Sondierungen vorhanden, so dass hier nur noch wenige ergänzende Bohrungen ausgeführt werden mussten. An den Talrändern hingegen, wo mit sehr wechselhaften Untergrundverhältnissen zu rechnen war und tiefere Bohrungen fehlten, wurden entlang dem Projekttrassee ergänzende Kernbohrungen, Bohrlochversuche und Grundwasserspiegelmessungen durchgeführt.

Eine erste Sondierkampagne erfolgte im Jahre 1989 auf der gesamte Projektlänge Hardhof – Lyren – Frauental – Moos. Dabei wurden insgesamt 27 Kernbohrungen mit einer Gesamtlänge von rund 1070 m ausgeführt. Nachdem im Limmattal bei Altstetten eine alternative Linienführung gewählt wurde, waren im Jahr 1991 in Altstetten noch 4 weitere Kernbohrungen mit einer Gesamtlänge von 170 m auszuführen. Die dabei gewonnenen geologischen Kenntnisse und die ermittelten Bodenkennwerte bildeten einen wichtigen Bestandteil der Ausschreibungsunterlagen.

Auch während der Bauphase wurden an kritischen Stellen, wie z.B. bei der Unterquerung der Limmat und im Übergangsbereich vom Schotter in die Moräne bei Altstetten, noch 5 weitere Kernbohrungen durchgeführt.

3. Bauschächte Aargauerstrasse und Am Giessen

3.1 Bauausführung

Als Hilfsschächte für den Stollenbau wurden im Limmattal die beiden Bauschächte "Aargauerstrasse" und "Am Giessen" bei Höngg erstellt. Der Schacht Aargauerstrasse erschloss mit einer Tiefe von 15 m fast vollständig den grundwasserführenden Limmattal-Schotter. Der Schacht "Am Giessen" lag am Rand des Schottervor-

kommens vorwiegend in jungen Gehängeablagerungen, Seeablagerungen und Moräne.

Aus Rücksicht auf das Grundwasser sollten möglichst keine Bauteile im Untergrund belassen werden, weshalb bei beiden Schächten eine Spundwand als Baugrubenabschluss gewählt wurde. Beim Schacht Aargauerstrasse wurde die rund 12 m unter dem Grundwasserspiegel liegende Schachtsohle mit Mikropfählen (Stabankern) gegen Auftrieb gesichert. Beide Schächte wurden nach Abschluss des Stollenvortriebs wieder aufgefüllt, und die Spundwände wurden gezogen.

3.2 Geologisch bedingte Probleme beim Schachtbau

Der Bauschacht Aargauerstrasse war in einer früheren Projektphase rund 60 m vom späteren Standort entfernt projektiert. Eine dort ausgeführte Kernbohrung hatte gezeigt, dass die Schachtsohle weitgehend in feinkörnige, wenig durchlässige Silt- und Sandschichten zu liegen käme. Nach der Projektänderung wurde auf eine ergänzende Bohrung am schliesslich gewählten Standort verzichtet.

Während den Aushubarbeiten und vor allem im Zuge der Bauwasserhaltung zeigte sich dann aber, dass der Schacht an diesem Standort bis zur Sohle durchwegs im gut durchlässigen Limmattalschotter liegt. Die in der offenen Wasserhaltung gepumpte Wassermenge war wesentlich grösser als prognostiziert und bedingte den Bau von kapazitiven Versickerungsanlagen für die Rückgabe des Grundwassers. Nachdem auch die Kapazität dieser Anlagen nicht mehr ausreichte, wurde ein Teil des Grundwassers in drei bestehenden Versickerungsbrunnen auf der östlichen Seite der Europabrücke zur Versickerung gebracht. Mit einer vorgängigen Sondierbohrung am neuen Standort des Schachtes hätten diese Überraschungen vermieden werden können.

Für den Bauschacht Am Giessen wurde, gestützt auf die Ergebnisse einer vorgängig am Schachtstandort durchgeführten Kernbohrung, eine gerammte Spundwand als Baugrubenabschluss vorgesehen. Das Rammen der Spundwände erwies sich jedoch wegen grösserer Findlinge, welche innerhalb von feinkörnigen Seeablagerungen als "drop-stones" auftraten, als unmöglich. Das gesamte Spundwandprofil musste in der Folge vorgebohrt werden.

4. Schacht und Kaverne Lyren

4.1 Bauausführung

Direkt neben dem Trinkwasserreservoir Lyren, oberhalb von Altstetten, wurde der rund 120 m tiefe Vertikalschacht Lyren mit einer Kaverne an der Basis erstellt. Der Schacht weist einen Durchmesser von 7.4 m auf und erschliesst zuoberst rund 10 m Moräne und darunter Gesteine der Oberen Süsswassermolasse. Er wurde im Sprengverfahren in Abschnitten von ca. 2 m Höhe abgeteuft (Figur 3). Wegen der unmittelbaren Nähe zum bestehenden Reservoir Lyren war im oberen Abschnitt ein möglichst schonender Sprengvortrieb erforderlich. Die Auswirkungen der Sprengungen mussten mit Erschütterungsmessungen am bestehenden Bauwerk

Fig. 3: Bohrungen für den Sprengvortrieb im Schacht Lyren (Aufnahme S. Mützenberg).

kontrolliert und die Sprengladungen entsprechend angepasst werden. Die Schachtwände wurden im oberen Abschnitt mit Stahlnetzen und Spritzbeton, im unteren Abschnitt mit Stahlfaser-Spritzbeton gesichert.

Für den Ausbruch der Kaverne am Schachtfuss kam eine Teilschnittmaschine zum Einsatz. Der Schacht für die Steigleitung wurde neben dem Hauptschacht mit einem Durchmesser von 2.4 m im "Raise Drill"-Verfahren von unten nach oben aufgebohrt.

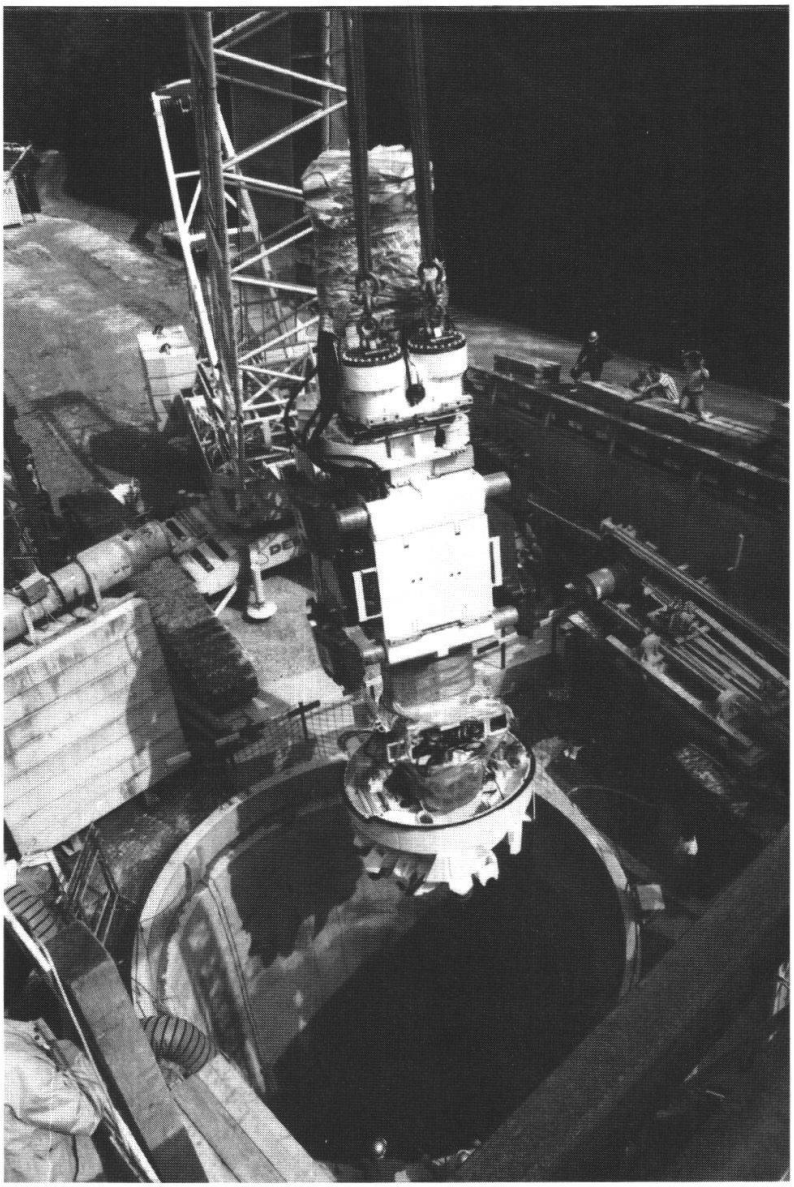
Der Schacht und die Kaverne Lyren dienten während der Bauausführung als Montage- und Demontageschacht für die Tunnelvortriebsmaschine sowie für die Förderung des Ausbruchmaterials (Figur 4). Nach Abschluss aller Bauarbeiten und nach der Demontage der beiden Tunnelbohrmaschinen wurden sie für die permanente Erschliessung und Wartung der Transportleitung ausgebaut.

4.2 Ergebnisse der geologischen Aufnahmen

a) Gesteinsschichten

Das geologische Schichtprofil im Schacht und in der Kaverne Lyren zeigt die für die Obere Süsswassermolasse charakteristische Wechsellagerung von Sandsteinen, Siltsteinen und Mergeln. Innerhalb dieser Abfolge fallen die folgenden Schichthorizonte besonders auf:

Fig. 4:
Einfahren der neuen TBM Typ Herrenknecht in den Schacht Lyren (Aufnahme S. Mützenberg).



- Zwischen ca. 67 und 74 m u.T. (Kote ca. 422 – 415 m ü.M.) wurde eine vergleichsweise mächtige, harte Sandsteinschicht angetroffen, welche rinnenförmig in die darunterliegenden Mergel eingebettet ist.
- Zwischen ca. 98 und 105 m u.T. (Kote ca. 391 – 384 m ü.M.) lag ein ebenfalls mehrere Meter mächtiger, harter, glimmerreicher Sandstein mit deutlicher Kreuzschichtung und Resten von glänzend-schwarzer "Pechkohle".
- An der Basis der Kaverne, in ca. 120 – 122 m Tiefe (Kote ca. 369 – 367 m ü.M.) stehen weiche Mergel und Tonsteine an, welche gegen unten in einen fossilreichen Kalkmergel ("Muschelbrekzie") übergehen.

b) Klüftung

Bis in eine Tiefe von ca. 70 m weisen die Gesteinsschichten eine ausgeprägte Klüftung mit meist steilstehenden WNW–ESE bis NW–SE-streichenden Kluftflächen auf. Die Kluftrichtung verläuft etwa parallel zum südlichen Talrand des Limmattales, die Klüfte dürften damit der Talklüftung entsprechen. Untergeordnet, jedoch bis in grössere Tiefen, treten auch senkrechte, ungefähr N–S streichende Klüfte auf.

Die Klüfte konzentrieren sich fast ausnahmslos auf harte Silt- und Sandsteine und verlieren sich in den angrenzenden weicheren Mergelschichten. Die Kluftflächen sind in der Regel geschlossen.

c) Wasserführung
Innerhalb der durchörterten Gesteinsfolge wurden vier Zonen mit einer geringen Wasserführung angetroffen. Die Wasserzirkulation war jeweils an geklüftete bis leicht verwitterte Silt- und Sandsteinbänke gebunden. Die Wasserzutritte waren insgesamt jedoch nur sehr bescheiden.

d) Gas
Beim Antreffen der kohleführenden Sandsteinschicht zwischen 98 und 105 m u.T. wurde nach einem Wochenende, vor dem Einschalten der Lüftung, eine Gasmessung mit einem auf Methan geeichten Messgerät durchgeführt. Dabei war in der Umgebungsluft keine Methankonzentration messbar.

5. Stollenvortrieb mit TBM

5.1 Bauausführung

Die rund 1.2 km lange Felsstrecke zwischen der Kaverne Lyren und Altstetten wurde mit einer Hartgesteins-Vollschnittmaschine ∅ = 3.0 m aufgefahren (Figur 4). Unter Altstetten traf die TBM auf die Hydroschildmaschine, welche in Gegenrichtung vom Bauschacht Aargauerstrasse aus vorgetrieben worden war (s. Kap. 6). Der Ausbau beider Vortriebsmaschinen erfolgte anschliessend durch den Schacht Lyren.

5.2 Ergebnisse der geologischen Aufnahmen

a) Gesteinsschichten
Die Stollenaxe verläuft in diesem Abschnitt praktisch parallel zur Streichrichtung in der Molasse, so dass im Stollen ein weitgehend horizontales Schichtpaket durchörtert wurde
Im Stollenprofil wurden vorwiegend kompakte, kaum verwitterte Mergel angetroffen. Einzelne dunkelgraue kohlige Horizonte innerhalb der Mergel konnten über grössere Strecken als "Leithorizonte" verfolgt werden.

Zwischen ca. Tm 40 und Tm 120 erschien im Stollenfirst ein dunkelgrauer, toniger und stark kohliger Mergel mit glatten, glänzenden Gleitharnischen. Diese auch als "Spiegelbrekzie" bekannten Gesteine erschwerten den Stollenvortrieb in diesem Abschnitt, indem sich Gesteinsstücke vom First lösten und eine zusätzliche Ausbruchsicherung mit Stahleinbau erforderlich machten.

Mächtigere persistente Sandsteinbänke wurden zwischen Tm 0 und Tm 200 und ab ca. Tm 800 angetroffen. Letztere dürfte mit der bereits im Schacht Lyren in ca. 98 – 105 m u.T. durchörterten Sandsteinbank korrelierbar sein.

Zwischen ca. Tm 1112 und 1119 erfolgte der Übergang von der Molasse in die darüberliegende Moräne. Der Ausbruch mit derselben Hartgesteins-TBM erfolgte

noch über eine Strecke von rund 100 m in der sehr kompakt gelagerten, trockenen Moräne, bevor die Hydroschildmaschine erreicht wurde.

b) Wasserführung
Die durchfahrenen Gesteinsschichten der Molasse waren weitgehend ungeklüftet und wiesen keine erkennbare Wasserführung auf. Kurz vor dem Einfahren in die Moräne waren die anstehenden Gesteine jedoch zunehmend feucht und dementsprechend leicht verwittert. Bedeutende Wasseraustritte wurden aber auch hier nicht festgestellt. Ebenso war im Übergangsbereich von der Molasse in die Moräne und in der Moräne keine nennenswerte Wasserführung zu beobachten.

5.3 Erfahrungen beim Vortrieb mit der TBM

Beim Vortrieb in den Gesteinen der Molasse ergaben sich mit Ausnahme der zusätzlichen Ausbruchsicherung im Bereich der kohligen Mergel keine unerwarteten Schwierigkeiten.

Rund 50 m vor dem Übergang in die Moräne war das Gebirge zunehmend feucht. Infolge der damit verbundenen geringeren Festigkeit war die Verspannung der Maschine in diesem Abschnitt z.T. erschwert, und die Ausbruchsicherung wurde zunehmend aufwendiger. Ähnliche Erschwernisse traten auch beim Vortrieb in der Moräne auf. Hier stellte sich als weiteres Problem, dass grössere Steine und Blöcke vom Bohrkopf unzerkleinert aus der Ortsbrust gelöst wurden, den Materialtransport auf dem Förderband behinderten und manuell aussortiert werden mussten. Dennoch konnte aber auch der Abschnitt in der Moräne mit der Hartgesteins-TBM ohne grössere Schwierigkeiten aufgefahren werden, was der kompakten Lagerung und der weitgehenden Trockenheit des Materials zu verdanken war.

6. Stollenvortrieb mit Hydroschild

6.1 Bauausführung

Die vollständig im grundwassergesättigten Lockergestein verlaufende Teilstrecke Am Giessen – Altstetten wurde mit einem Hydroschild ∅ = 2.6 m in Verbindung mit Pressrohren aus Stahlbeton vorgetrieben. Diese Vortriebsart, bei welcher die Ortsbrust mit einer unter Druck stehenden Bentonitsuspension gestützt wird, erlaubte einen Vortrieb unter dem Grundwasserspiegel. Auf eine Absenkung des Grundwasserspiegels entlang des Stollens konnte damit vollständig verzichtet werden. Ein im Schild eingebautes Schneidrad löste das anstehende Lockermaterial, welches mit einer hydraulischen Förderung unter Überdruck abtransportiert wurde. Grössere Steine und Blöcke mussten mit einem Brecher bei der Einlassöffnung hinter dem Schneidrad zerkleinert werden. In einer Separierungsanlage neben dem Pressschacht wurde die Bentonitsuspension vom ausgebrochenen Lockergestein getrennt und wieder in den Kreislauf zurückgeführt.

Als Startpunkt und Pressschacht für den Hydroschildvortrieb diente der Bauschacht Aargauerstrasse. Von hier aus wurde der Stollen vorerst mit einer Steigung von 3‰ nach Norden, in Richtung des Zielschachtes Am Giessen, vorgetrie-

ben. Der Stollen unterquerte dabei unter anderem die Nationalstrasse A1 und bei einer Überdeckung von nur 5.5 m die Limmat im Staubereich des Wehrs Höngg. Im Zielschacht Am Giessen wurde die Hydroschildmaschine ausgebaut und erneut zum Startschacht transportiert. Von hier erfolgte der Vortrieb mit einem Gefälle von 5.5‰ nach Süden, unter den SBB-Gleisen und dem Quartier Altstetten hindurch bis in die Moräne unter Altstetten.

6.2 Ergebnisse der geologischen Aufnahmen

Die mit der Hydroschild-Maschine durchfahrenen Lockergesteinsschichten konnten im Normalbetrieb nicht eingesehen werden. Den einzigen Aufschluss über die Zusammensetzung des durchfahrenen Untergrundes lieferte das geförderte Ausbruchmaterial nach der Bentonitseparierung. Feinanteile waren darin jedoch nicht mehr vorhanden, und grössere Steine oder Blöcke waren vom Brecher zerkleinert worden. Die nachfolgenden Angaben über die Gesteinsschichten stützen sich vor allem auf die Angaben des Bauführers.

Der Stollenabschnitt zwischen dem Schacht Aargauerstrasse und der Limmat verlief im Grenzbereich zwischen dem Limmattal-Schotter und den darunterliegenden Sandschichten. Unter der Limmat wurden über kürzere Streckenabschnitte auch siltig-sandige Seeablagerungen durchörtert, bevor der Schild unter dem rechten Limmatufer, kurz vor dem Zielschacht Am Giessen, auf ältere, kompakt gelagerte Seeablagerungen traf. Wie bereits beim Aushub des Schachtes Am Giessen festgestellt worden war, sind in diesen Seeablagerungen zahlreiche grössere Blöcke und Findlinge eingelagert. Diese erschwerten auf einer rund 30 m langen Strecke den Vortrieb ausserordentlich und machten zahlreiche Einstiege in die Abbaukammer erforderlich.

Beim anschliessenden Vortrieb von der Aargauerstrasse in Richtung Altstetten wurde vorwiegend Sand und nur untergeordnet Schotter durchfahren. Im Bereich des Bahnhofs Altstetten und ab ca. Tm 410 traf der Stollen auf siltig-sandige Seeablagerungen. Generell nahm der Feinanteil in Richtung Süden zu, was die Bentonitseparierung zunehmend erschwerte und beim Bauschacht Aargauerstrasse die Erstellung grösserer Absetzbecken erforderlich machte.

Zwischen ca. Tm 500 und 640 wurde moränenartiger, gletschernaher Schotter durchfahren. Der Schotter war generell sandig-kiesig zusammengesetzt und wies einen hohen Feinanteil und zonenweise zahlreiche Steine und Blöcke auf. Der Stollenvortrieb im grundwassergesättigten Schotter erfolgte hier unter einem hydrostatischen Druck bis ca. 1.5 bar. Ab Tm 640 bis zum Vortriebsende bei Tm 770 lagen im Stollenprofil gletschernahe Seeablagerungen und Moräne. Der Vortrieb in diesen gletschernahen Schichten war vor allem durch das Auftreten von grösseren Blöcken erschwert, und ab Tm 600 waren zahlreiche Einstiege in die Abbaukammer erforderlich.

Gestützt auf die Ergebnisse von zwei ergänzenden Kernbohrungen, welche in Altstetten zur exakten Lokalisierung der Oberfläche und der Beschaffenheit der Moräne ausgeführt worden waren, wurde der Vortrieb mit der Hydroschildmaschine bei Tm 770 in der kompakten, trockenen Moräne eingestellt. Die Anschlussstrecke zur Kaverne Lyren wurde im Gegenvortrieb mit einer konventionellen Hartgesteins-Vollschnittmaschine aufgefahren (s. Kap. 5).

6.3 Erfahrungen beim Vortrieb mit Hydroschild

a) Bestehende Bauten
Der Stollen unterfuhr bei zum Teil nur geringer Überdeckung verschiedene Objekte, namentlich zahlreiche Gebäude in Altstetten, die SBB-Geleise, die Nationalstrasse A1, Fundamente und Widerlager von Auffahrtsrampen zur Europabrücke und die Limmat. Die hohen Anforderungen an einen erschütterungsfreien und setzungsarmen Vortrieb im Lockergestein wurden durch die gewählte Vortriebsmethode vollumfänglich erfüllt.

b) Hindernisse
Eine spezielle Betrachtung verlangten mögliche Hindernisse im Untergrund, welche vom Schneidrad nicht abgebaut oder vom Backenbrecher nicht zerkleinert werden können und manuell aus der Abbaukammer entfernt werden müssen.

Bei jedem Einstieg in die Abbaukammer muss die Stützsuspension abgepumpt und durch Druckluft ersetzt werden. Für die Arbeit unter Druckluft wird das Personal in einer im Schild integrierten Druckkammer ein- und ausgeschleust. Diese Ein- und Ausschleuszeiten und vor allem auch die stark erschwerten Arbeitsbedingungen in der Abbaukammer führen meist zu längeren Stillstandzeiten und damit zu Bauverzögerungen und Mehrkosten. Aus diesem Grund kam der Erfassung möglicher Hindernisse eine sehr grosse Bedeutung zu.

Im Limmattal war grundsätzlich mit folgenden Hindernissen zu rechnen:

- nicht bekannte, im Untergrund belassene Spundwände oder Pfahlfundationen,
- Anker z.B. von früheren Baugrubenumschliessungen,
- Holzstämme, welche vom Schneidrad nicht abgebaut werden können,
- grössere Steine und Blöcke, welche den Backenbrecher und die Einlassöffnung verstopfen.

Bereits vor dem Stollenvortrieb waren alle im Untergrund verbliebenen Spundwände und Anker erfasst worden. Der geringste Abstand zwischen Hydroschild und einer bekannten Spundwand betrug 1 m. Beim Vortrieb wurden denn auch keine Spundwände angetroffen.
Da die meisten Bauten im Limmattal flach fundiert sind, waren keine Hindernisse durch Pfählungen vorhanden.

Grössere Holzstämme waren bereits verschiedentlich in den Lockergesteinen des Limmattales angetroffen worden. Vor allem im Bereich des heutigen Limmatlaufes musste mit Schwemmholz gerechnet werden. Tatsächlich wurden hier auch einzelne kleinere Holzstücke wie Äste und Wurzeln im Abbaumaterial angetroffen. Sie führten aber zu keinen Behinderungen.

Besonders kritisch wurde das Risiko beurteilt, dass grössere Steine oder Blöcke im Limmattal-Schotter und in der Moräne vom Backenbrecher nicht mehr abgebaut werden könnten und manuell aus der Abbaukammer entfernt werden müssten. Deshalb wurde im Werkvertrag zwischen Unternehmung und Bauherrschaft ein Grösstkorn als sog. "Vertragsstein" festgelegt. Nur für Einstiege, welche aufgrund grösserer Steine als dieses "Vertragssteins" notwendig waren, konnte der Unternehmer zusätzlichen Aufwendungen verrechnen. Die Grösse des Vertragssteins wurde gestützt auf Aufnahmen und Erfahrungen in offenen Baugruben im Zürche-

rischen Limmattal ermittelt. Dabei wurde festgestellt, dass im Limmattal-Schotter ein Korndurchmesser von 25 cm äusserst selten überschritten wird, worauf der Vertragsteins mit Korndurchmesser 25 cm festgelegt wurde. Zur Risikoverminderung hat dann aber die Unternehmung den Backenbrecher für einen Durchmesser von 30 cm konzipiert.

Im Limmattalschotter führte dank dieser Massnahme dann nicht die Korngrösse einzelner Steine zu Schwierigkeiten, sondern das Auftreten von Schichten mit einer überdurchschnittlich hohen Anzahl von Steinen, ungeachtet des exakten Durchmessers. In diesen Schichten war die Vortriebsleistung der Maschine grösser als die Leistung des Brechers, was zu einer Ansammlung von Steinen und zum Verklemmen der Brecherbacken führte. Dies erforderte jeweils einen Einstieg in die Abbaukammer und ein manuelles Ausräumen der Steine.

In den gletschernahen Seeablagerungen und der Moräne an beiden Talflanken des Limmattales stellten die zahlreichen und grossen Blöcke mit Kantenlängen von teilweise mehr als 1 m nennenswerte Probleme. Es waren viele Einstiege in die Druckkammer erforderlich, wobei die Blöcke manuell zerkleinert und entfernt werden mussten. Im Normalfall dauerten die Einstiege jeweils ca. 3 Stunden, bei einem Überdruck von maximal rund 2.5 bar.

c) Ausbläser
Bei geringer Überdeckung besteht die Gefahr, dass die Bentonitsuspension oder die Druckluft plötzlich in das umgebende Lockergestein und an die Oberfläche austritt und die Ortsbrust infolge der fehlenden Stützung einbricht. Ein solcher "Ausbläser" kann einen Arbeiter in der Abbaukammer gefährden und zu einem grösseren Wasser- und Materialeinbruch im Schild führen.

Das Risiko eines Ausbläsers war bei der Unterquerung der Limmat am grössten, da die Überlagerung an der heikelsten Stelle mit 5.5 m nur sehr gering war. Zudem musste unter dem Flussbett mit locker gelagertem, blockigem und hochdurchlässigem Flussgeschiebe gerechnet werden. Aus diesem Grund wurde zu Beginn der Vortriebsarbeiten in diesem Abschnitt eine vorgängige Stabilisierung des Schotters mit Rütteldruckverfahren oder Injektionen ins Auge gefasst. Da diese Massnahmen sehr aufwendig und teuer gewesen wären, entschied man sich aber, zuvor den Aufbau und die Zusammensetzung des Untergrundes unter dem Flussbett der Limmat mit drei Kernbohrungen genauer zu untersuchen.

Die Kernbohrungen zeigten, dass auf dem Stollenniveau vorwiegend sandige und siltige Seeablagerungen vorlagen. Der darüberliegende Limmattalschotter war gut abgestuft, d.h. er wies eine gute Verdichtbarkeit auf, und kritische feinanteilfreie Kies- oder Steinlagen waren nicht vorhanden. Zudem war die Schichtung horizontal, was auf eine relativ geringe vertikale Durchlässigkeit schliessen liess. Aufgrund dieser Faktoren wurde das Risiko eines Ausbläsers unter der Limmat nicht wesentlich grösser eingestuft als auf der bereits durchfahrenen Strecke. Auf vorauseilende stabilisierende Massnahmen wurde daher verzichtet.

Um das Risiko eines Ausbläsers unter der Limmat aber dennoch zu minimieren, wurden folgende Vorbeugemassnahmen durchgeführt:

- Am linken Limmatufer wurde die Hydroschildmaschine noch einmal vollständig überprüft, und es wurden alle Wartungsarbeiten im Abbauraum durchgeführt.

Damit sollte verhindert werden, dass infolge eines Maschinen- oder Materialschadens unter der Limmat ein Einstieg in die Abbaukammer erforderlich würde.
- Der Vortrieb unter der Limmat erfolgte ohne Stillstand im 24-Stunden-Betrieb.

Dank diesen Massnahmen konnte die Limmat problemlos unterfahren werden.

7. Stollen Am Giessen – Anschluss Käferbergstollen

7.1 Bauausführung

Der rund 260 m lange Stollenabschnitt vom Bauschacht Am Giessen bis zum Anschluss an den Käferbergstollen wurde konventionell mit einem Hydraulikbagger vorgetrieben. Der Ausbruch erfolgte in Abschlägen von etwa 1 bis 2 m Länge, welche sofort mit Stahlbögen, Netzen und Spritzbeton gesichert wurden. Die Stollenaxe verläuft mit einer Steigung von ca. 5.5% vorerst in Richtung NE, d.h. in den Hang hinein, und ab ca. 100 m parallel zum Talhang in Richtung Osten.

7.2 Ergebnisse der geologischen Aufnahmen

a) Gesteinsschichten
Vom Bauschacht Am Giessen wurde der Stollen vorerst durch kompakt gelagerte, ältere Seeablagerungen und Moräne vorgetrieben. Ab ca. Tm 30 waren in der Moräne mehrere m-grosse Molasseblöcke eingelagert, welche zunehmend den ganzen Stollenquerschnitt ausfüllten. Bis ca. Tm 60 bestand das Stollenprofil praktisch ausschliesslich aus Gesteinen der Molasse. Nur vereinzelte kiesige Zwischenlagen deuteten darauf hin, dass es sich nicht um den anstehenden Molassefels, sondern um aufgeschürfte und in der Moräne eingelagerte Molasseblöcke handelte.

Bei ca. Tm 70 wurde der anstehende Molassefels angetroffen. Von hier bis zum Stollenende wurde im ansteigenden Stollen eine rund 10 m mächtige Schichtfolge der Molasse von den tieferliegenden zu den höherliegenden Schichten durchfahren. An deren Basis lag eine vergleichsweise harte Siltstein-/Feinsandsteinschicht. Darüber folgten, gut abbaubare Mergel mit einzelnen Siltsteinschichten. Auffallend darin war eine rund 0.3 m mächtige, helle Kalkmergelbank und wenige Meter darüber zwei violette, tonige Mergelhorizonte mit zahlreichen Fossilschalen (Schnecken). Aufgrund der Höhenlage ist diese Kalkschicht dem Meilener Kalk, einem verbreiteten Leithorizont in der Zürcherischen Molasse, zuzuordnen (s. Kap. 8).

b) Klüftung/Wasserführung
Zwischen ca. Tm 70 und Tm 90 wurden in der Molasse mehrere E–W-streichende Grossklüfte angetroffen, welche mit ca. 60 – 70° gegen S bis SSW einfielen. Die Klüfte waren teilweise offen, oder mit kiesigem Material gefüllt und wiesen eine Wasserführung bis zu einigen 10 l/min auf.

Auch kurz vor dem Anschluss an den Käferbergstollen fielen analoge, steil gegen S bis SSW einfallende Klüfte auf. Diese wiesen hier einen klar erkennbaren, vertikalen Versatz der Schichtung auf, wobei jeweils die talseitigen Schichtpakete um einige dm nach unten verschoben waren.

Auch bei anderen Molasseaufschlüssen am nordöstlichen Talrand des Limmattales in Zürich ist diese ausgeprägte Klüftung schon festgestellt worden. Es könnte sich dabei ebenso um tektonische Klüfte wie um eine Talklüftung handeln. In jedem Fall dürfte diese Klüftung und die damit verbundene Auflockerung des Gesteinsverbandes die Ursache für die an diesem Talhang häufig anzutreffenden, vom Gletscher aufgeschürften und in der Moräne eingelagerten Molassepakete sein.

7.3 Erfahrungen beim Vortrieb

Die Gesteine im Stollenabschnitt Am Giessen – Anschluss Käferbergstollen waren insgesamt gut abbaubar und standfest. Insbesondere die Lockergesteine (Seeablagerungen und Moräne) erwiesen sich als kompakt gelagert und erstaunlich standfest. Die Wasserführung von Lockergestein und Fels war mit Ausnahme von einzelnen stark wasserwegsamen Klüften unbedeutend.

Schwierigkeiten ergaben sich beim Vortrieb in der Siltstein-/Feinsandsteinschicht mit hohem Verfestigungsgrad kurz nach Eintritt in den anstehenden Fels. Laboruntersuchungen an Gesteinsproben ergaben Druckfestigkeiten von bis zu 132 N/mm^2, welche damit über den durchschnittlichen Werten für Siltsteine der Molasse lagen. Die grosse Mächtigkeit der angetroffenen Schicht, das vergleichsweise kleine Stollenprofil und die Vortriebsart mit Abbauhammer führte hier dementsprechend zu Erschwernissen und Verzögerungen beim Vortrieb.

8. Leithorizonte der Oberen Süsswassermolasse

In der weiteren Umgebung von Zürich sind in der Oberen Süsswassermolasse verschiedene Leithorizonte bekannt, welche grossräumig verbreitet sind und die Grundlage für die stratigraphische Gliederung der Molasse bilden. Zu diesen Leithorizonten zählen Bentonite, welche durch die Ablagerung vulkanischer Asche gebildet wurden, sowie in ausgedehnten, flachen Seen abgelagerte Süsswasserkalke.

Der Meilener Kalk, ein bekannter Süsswasserkalk mit grossem Verbreitungsbereich, ist bei Zürich-Altstetten, knapp 2 km nordnordwestlich des Schachtes Lyren, auf Kote 420 m ü.M. aufgeschlossen (Pavoni et al. 1992). Ausgehend von einer mit 2° gegen SE gerichteten Schichtneigung in der Molasse war der Meilener Kalk beim Schacht Lyren rund 50 – 60 m tiefer, d.h. ca. auf Kote 360 – 370 m ü.M. zu erwarten.

Bis zur Ausbruchsohle der Kaverne bei Kote 369 m ü.M. wurde bei der Aufnahme kein Süsswasserkalk angetroffen. Allerdings wurde in einer lokalen Vertiefung an der Kavernensohle auf Kote 368 m ü.M. die Obergrenze eines fossilreichen Kalkmergels erschlossen. Gestützt auf den bekannten Aufschluss in Altstetten dürfte diese Schicht dem obersten Horizont des Meilener Kalkes entsprechen. Ein weiterer Kalkmergelaufschluss war in einer Bohrung in Altstetten praktisch auf derselben Kote, rund 12 m unter der Stollensohle angetroffen worden (Figur 2). Da die Molasseschichten in Richtung der Stollenaxe praktisch horizontal verlaufen, ist auch dieser Kalkhorizont dem Meilener Kalk zuzuordnen.

Am Nordrand des Limmattales wurde im Stollenabschnitt Am Giessen – Käfer-

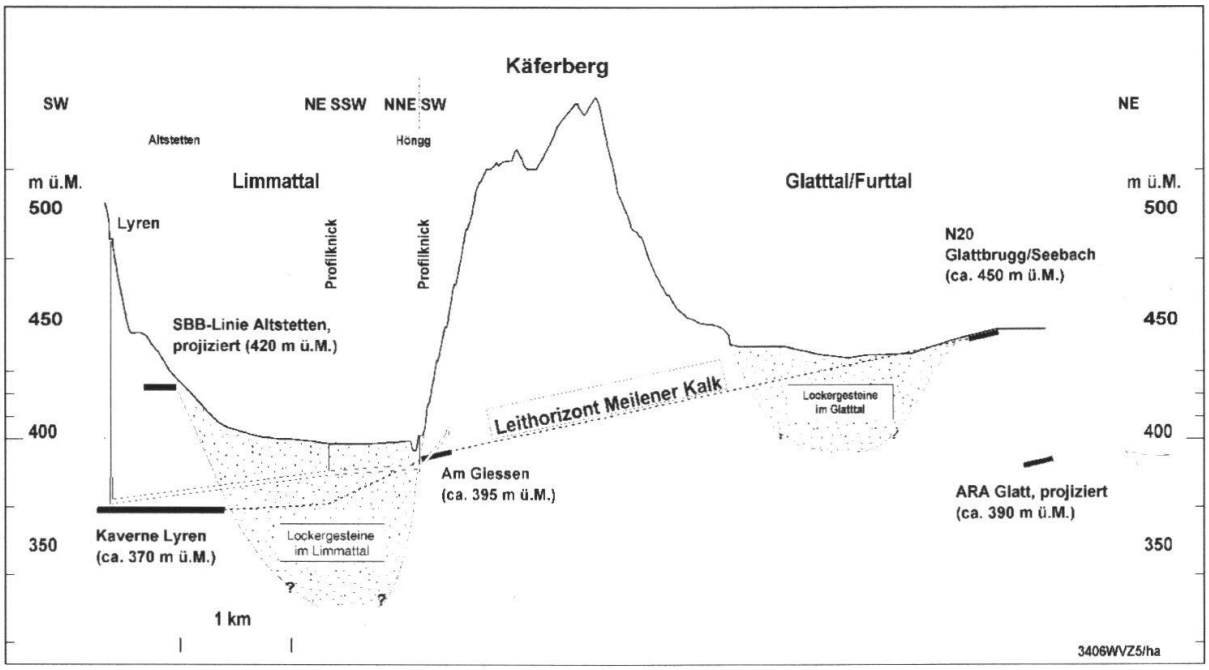


Fig. 5: Verbreitung und Korrelation des Meilener Kalkes der Oberen Süsswassermolasse im NW-Gebiet der Stadt Zürich (Überhöhung ca. 20x).

bergstollen ein vergleichbarer Kalkhorizont rund 25 m höher, auf Kote 395 m ü.M. angetroffen (Figur 2). Dieser war hier bereits beim seinerzeitigen Bau des Käferbergstollens festgestellt und dem Meilener Kalk zugeordnet worden (Pavoni & Schindler 1981). Unter Berücksichtigung der gegen NNE abgewinkelten Stollenaxe und des generellen Ansteigens der Molasseschichten in Richtung NW, lässt sich auch dieser Aufschluss mit den oben beschriebenen Kalken bei Altstetten stratigrafisch korrelieren (Figur 5).

Ausgehend von einer mit ca. 2° gegen SE geneigten Schichtlagerung der Molasse im Nordschenkel der Uetlibergsynklinale lassen sich also die Aufschlüsse des Meilener Kalks zwischen beiden Flanken des Limmattales korrelieren. Auch der bekannte Aufschluss bei der N20 in Glattbrugg kann entsprechend dieser Schichtlagerung mit den oben genannten Aufschlüssen korreliert werden. Vor kurzem wurde zudem bei der ARA Glatt ein Kalkmergel erbohrt, welcher ebenfalls dem Meilener Kalk zugeordnet werden kann.

Der bekannte Bentonithorizont von Urdorf liegt stratigraphisch 50 – 60 m über dem Meilener Kalk (Pavoni & Schindler 1981) und müsste im Schacht Lyren durchörtert worden sein. Bei der Schachtaufnahme wurden rund 55 m über der Kavernensohle, bei Kote ca. 427 m ü.M. ein Tonhorizont vorgefunden, welcher jedoch wegen des raschen Baufortschritts nicht genauer untersucht werden konnte. Möglicherweise handelt es sich hierbei um den Bentonithorizont von Urdorf.

9. Schlussfolgerungen

Der geologische Bericht und die geologische Prognose für das Bauprojekt stützten sich auf Erfahrungen früherer Tunnelbauten in vergleichbaren Gesteinen im Raum Zürich sowie eine gezielt durchgeführte, umfangreiche Bohrkampagne. Der Bericht lieferte mit die Grundlagen für die Wahl der Bau- und Vortriebsart und war Bestandteil der Ausschreibungsdokumente.

Die erdbaumechanischen Kennwerte der Lockergesteine (Durchlässigkeit, Kornverteilung, etc.) und die felsmechanischen Parameter der Molassegesteine (Dichte, Druckfestigkeit, etc.) konnten entsprechend dem heterogenen Aufbau meist nur mit einer Bandbreite angegeben werden. Die angetroffenen Erschwernisse, wie z.B. die zahlreichen und grossen Blöcke in den gletschernahen Seeablagerungen oder eine überdurchschnittlich stark verfestigte Siltstein-/Feinsandsteinschicht in der Molasse bei Höngg, müssen als geologische Risiken betrachtet werden, welche auch mit zusätzlichen Untersuchungen nicht vollständig hätten erfasst werden können.

Während der Bauausführung stellten sich in bautechnisch schwierigen Bereichen, wie beispielsweise bei der Limmatunterquerung oder beim Vortrieb in der kompakten Moräne unter Altstetten, häufig noch Detailfragen zu den Untergrundverhältnissen. Dank dem engen Zusammenwirken zwischen Bauherrschaft, Ingenieuren, Unternehmung und Geologen, aber vor allem dank der Bereitschaft der Bauherrschaft für ergänzende Sondierbohrungen, konnte der Vortrieb auch in diesen kritischen Abschnitten angemessen optimiert werden.

Verdankungen

Der Autor dankt der Wasserversorgung Zürich für die Möglichkeit, den vorliegenden Artikel publizieren zu können. Besonderer Dank gebührt auch Dr. P. Haldimann (Dr. H. Jäckli AG, Zürich) und G. Lüssi (Wasserversorgung Zürich) für die wertvollen Anregungen und die Begutachtung des Manuskripts.

Literatur

DR. HEINRICH JÄCKLI AG: Zahlreiche geologische und hydrogeologische Gutachten, nicht publiziert.

JÄCKLI, H. 1989: Geologie von Zürich, Orell Füssli, Zürich.

PAVONI, N., JÄCKLI, H. & SCHINDLER, C. 1992: Geologischer Atlas der Schweiz 1:25'000, 1091 Zürich, Atlasblatt 90. Landeshydrologie und -geologie.

PAVONI, N. & SCHINDLER, C. 1981: Bentonitvorkommen in der Oberen Süsswassermolasse und damit zusammenhängende Probleme. Eclogae geol. Helv. 74/1, 53–64.