Zeitschrift: Schweizer Ingenieur und Architekt
Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band: 114 (1996)
Heft: 18

Artikel: Bergmännische Tunnelstrecke
Autor: Chiaverio, Flavio / Hürzeler, Daniel
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-78961

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: 10.12.2025

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

Flavio Chiaverio, Daniel Hürzeler, Basel

Bergmännische Tunnelstrecke

Die bergmännische Tunnelstrecke weist nicht nur eine Vielzahl von Gesteinsarten und tektonischen Unterschieden auf, sondern stellt auch durch betonaggressive Bergwässer und quellfähige Gesteinszonen hohe Anforderungen.

Die Geologie des bergmännischen Tunnelabschnitts ist bereits eingehend im Artikel «Die Geologie des Adlertunnels» beschrieben. Der Adlertunnel kommt in die Jura- und Triasformation zu liegen und durchquert die Schichten des Gipskeupers, der Bunten Mergel, des Lias und des Opalinustones. Die geologischen Schichten sind in zahlreiche Schollen zerbrochen und im Bereich des Adlerhofgewölbes zum Teil übereinander geschoben und stark zerschert.

Die gemäss der geologischen Prognose vom Tunnel zu durchfahrenden Gesteinsformationen sind in (1) zusammengefasst. Die Längen der Lockergesteinsabschnitte betragen auf der Nordseite 70 m und auf der Südseite 100 m. Im Bereich der Portalzone Nord lagern über den Rheinschottern Schwemmlehme und Gehängeschutt. Gleichzeitig steigt die Felsoberfläche an und erreicht nach etwa 50 m das Niveau des Tunnels, wobei es sich um teilweise verwitterte, aufgeweichte Mergel des Gipskeupers und des Schilfsandsteins handelt. Beim Südportal liegt die Tunnelfirste zu Beginn im Hochterrassenschotter und die Sohle im Opalinuston. Letzterer steigt dann sukzessive an, bis das ganze Profil im Tongestein liegt.

Da Tone und Mergel vorherrschen und nur einzelne geringmächtige Dolomit- und Kalkschichten angeschnitten werden, wird mit einem geringen Wasserzufluss im Tunnel von maximal 10 - 20 l/s gerechnet.

1
Gesteinsformationen (Prognose)

Gesteinsformation	Längenanteil
Übergang Schotter/Fels	170 m
Gipskeuper	1095 m
Schilfsandstein, Bunte Mergel, Rhät	1490 m
Lias	1100 m
Opalinuston	407 m
Total bergmännische Strecke	4262 m

Im Bereich des Gipskeupers kann das Bergwasser jedoch sulfathaltig sein, was sich bei den Wasseranalysen aus den Sondierbohrungen bestätigte. Zum Teil ist auch mit Chloridwässern zu rechnen, die im Kontakt mit armierten Betonkonstruktionen zur Korrosion der Armierung führen können. Die zu durchfahrenden Gesteinsformationen sind durchwegs quellfähig. Neben den Tongesteinen mit ihren quellfähigen Tonmineralien ist vor allem der Gipskeuper mit dem Anhydrit hervorzuheben.

Randbedingungen für die Tunnelkonstruktion

Die zu durchfahrenden Gesteinsformationen und die zu erwartenden Gebirgswässer haben einen entscheidenden Einfluss auf die Gestaltung der Tunnelkonstruktion. Im Gegensatz zu anderen Tunnels bieten Geologie und Hydrologie einige besondere «Knacknüsse», die es bei der Bemessung und Auslegung des Tunnelgewölbes zu lösen galt, um die vorgesehenen Nutzungsziele und die Nutzungsdauer gewährleisten zu können.

Quellfähige Gesteinszonen

In der Projektphase wurde eine intensive Bohr- und Beprobungskampagne durchgeführt. Allein entlang der bergmännischen Tunnelstrecke wurden 24 Bohrungen abgeteuft. Die resultierenden Quelldrücke aus Laborversuchen zeigen mittlere Quelldrücke in den Tongesteinen und hohe Quelldrücke im Gipskeupergestein. Die Versuche laufen zum Teil bereits seit einigen Jahren, so dass auch die langfristige Quelldruckentwicklung erfasst werden kann. (2) zeigt die der Bemessung aus den Laborversuchen zugrunde gelegten Quelldruckwerte.

Beton- und armierungsaggressive Bergwässer

Die in den Bohrungen analysierten Bergwässer zeigen streckenweise hohe Sulfatkonzentrationen (SO_4-Ionen; Probe P: 2990 mg/l). Kommt der Beton in Kontakt mit Sulfatwasser, zeigen sich ab einer bestimmten Sulfatkonzentration Zerstörungserscheinungen im Betongefüge. Ettringit- und Taumasitbildung im Beton führen zu einem Aufsprengen, d.h. zu einer Zerstörung des Betons und damit auch zu einer Verminderung seiner Tragkraft. Das aus dem tiefliegenden Salzlager zum Tunnelniveau aufsteigende chloridhaltige (CL; Probe P: 310 mg/l) Bergwasser dringt in den Beton ein, was zu Korrosionserscheinungen an der Armierung und Betonabplatzungen führen kann, wodurch die Gebrauchsfähigkeit und die Traglast des Betontragelementes ebenfalls vermindert werden.

Wahl der Vortriebsmethode

Lockergesteinsstrecken Nord und Süd

In den Schottern auf der Südseite wird das Horizontaljettingverfahren angewendet. Vor dem Tunnelausbruch werden ausserhalb des effektiven Tunnelprofiles horizontale Betonpfähle hergestellt, indem mit Drücken bis zu 500 bar Zementinjektionsgut unter Rotation des Bohrgestänges in den Boden eingepresst wird. Der Zement verbindet sich mit dem anstehenden Gestein zu Betonsäulen. Im Schutze dieses Säulendaches wird der Tunnel dann konventionell mit Kalotten-, Strossen- und Sohlvortrieb aufgefahren. Der dicht gelagerte Schwemmlehm auf der Nordseite eignet sich nicht für die Erstellung von Säulen. Anstelle des Jettingverfahrens wird eine Spiessschirmdecke aus aneinanderliegenden ausbetonierten und mit Armierungsstahl (ø 36 mm) versehenen Bohrungen erstellt. Im Schutze dieses Spiessschirmes wird die Kalotte aufgefahren. Solange die Felsqualität dies erfordert, wird der Ringschluss auf konventionelle Art erstellt, danach aber werden Strosse und Sohle mit der TBM aufgefahren.

Felsstrecke

Der Adlertunnel wird mit einer Hartgesteins-Tunnelbohrmaschine (TBM) mit einem Schilddurchmesser von 12,58 m aufgefahren. Der Tübbingaussenradius beträgt 6,125 m. Als Vorgabe in der Submission wurde eine Rundumvermörtelung

2
Quelldruckwerte für die Bemessung

Gesteinsformation	max. Quelldruck q [MPa]
Gipskeuper, vorwiegend Anhydrit, Ton	6.0
Gipskeuper, vergipst	4.0
Schilfsandstein	1.2
Bunte Mergel	0.4
Rhät	1.2
Lias / Obtususton	1.2
Opalinuston	1.2

des Ringspaltes zwischen Tübbingring und Fels verlangt. Damit wird die Wasserwegigkeit in Tunnellängsrichtung erschwert, d.h., die Gefahr, dass Wasser von wasserführenden Gesteinszonen in quellhafte Zonen hineinfliesst und das Quellen begünstigt, wird minimiert. Die Verpressung des Ringspaltmörtels erfolgt dabei aus dem Schildschwanz heraus. Für Nachinjektionen des Ringspaltes sind im Nachläufer der TBM entsprechende Installationen vorgesehen. Genauere Details sind dem Artikel «Vortriebskonzept und Tübbings» zu entnehmen.

Die Wahl der Vortriebsmethode beim Adlertunnel hatte einen hohen Stellenwert für die Dauerhaftigkeit des Tunnels. Eine Risikoanalyse (siehe Artikel «Das Projekt» bzw. SI+A Heft 4/95) hat gezeigt, dass unter den gegebenen geologischen und hydrologischen Randbedingungen ein TBM-Vortrieb einem konventionellen Vortrieb in der Spritzbetonbauweise vorzuziehen ist.

Profiltypen

Lockergesteinsstrecken Nord und Süd

In den ersten Ausbruchetappen, in denen der Ringschluss konventionell erstellt wird, werden zum Vorschieben der TBM nur die Sohltübbings verlegt. Das Innengewölbe besteht auf diesen Strecken aus Ortbeton. Sobald die TBM die Strosse auffährt, wird der komplette Tübbingring aufgestellt. Das Innengewölbe wird ebenfalls aus Ortbeton erstellt.

Felsstrecke

Da auf der ganzen bergmännisch zu erstellenden Tunnelstrecke mit leicht bis stark druckhaftem Gebirge zu rechnen ist, wurde für das Tunnelprofil durchgehend die statisch ideale Kreisform gewählt, was auch die Anordnung eines begehbaren Entwässerungskanals unter den Gleisen ermöglicht, ohne dass deshalb das Profil zusätzlich vergrössert werden muss. Von den SBB ist ein Lichtraumprofil mit einem Radius von 4,90 m vorgegeben, dem ein minimaler Projektspielraum (beinhaltet technischen und baulichen Spielraum sowie Verformungen des Tunnelgewölbes) von 32,5 cm überlagert wurde. Für die Felsstrecke sind zwei Profiltypen vorgesehen. In den Tonstrecken gelangt Profiltyp I und in den Gipskeuperstrecken Profiltyp II (3) zur Anwendung.

Entwässerungs- und Abdichtungskonzept

Um das Gebirgswasser fernzuhalten, zu fassen und abzuleiten, werden folgende Massnahmen getroffen:

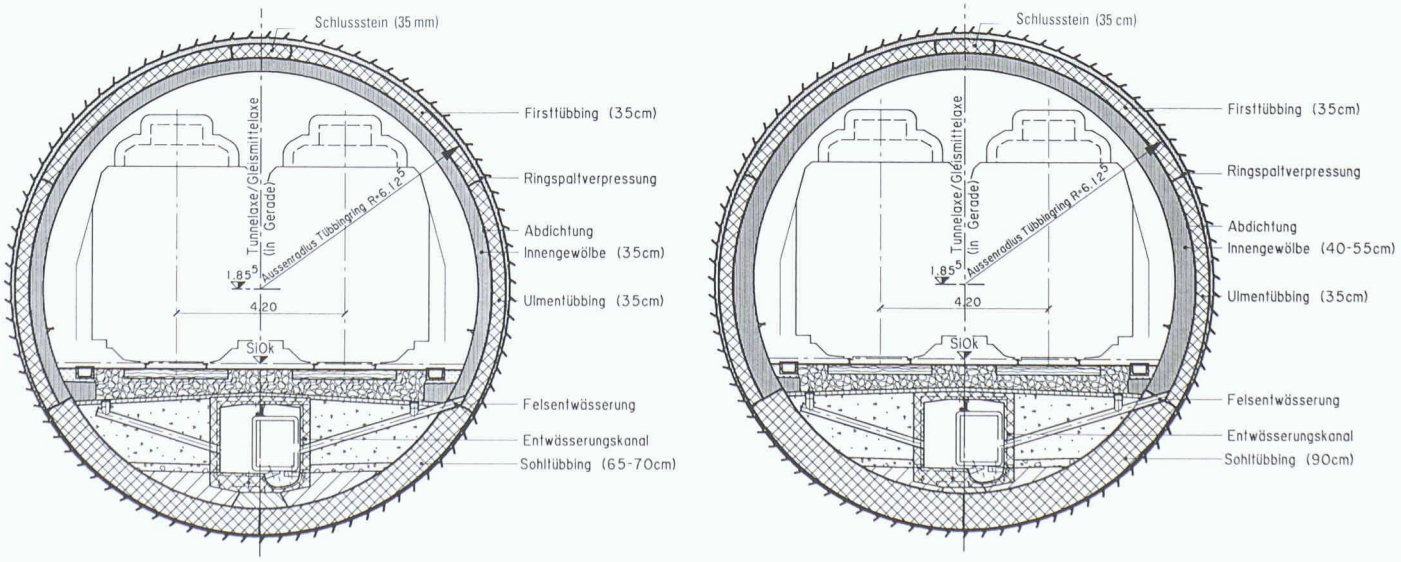
- Vermörtelung des Ringspalts zur Verminderung der Längszirkulation des Wassers
- Abdichtungsfolie im oberen Teil bis zur Absatzfuge des Sohltübbings zur Verhinderung von Tropfwasser im Fahrraum. Eine Abdichtung der Tunnelsohle ist nicht vorgesehen
- Verwendung von sulfatresistentem Microsilica-Tübbingbeton (Profiltyp I+II) und Beschichtung der Tübbings (Profiltyp II) zum Schutz gegen Sulfat- und Chloridangriff
- Periodische Wasserfassung und Ableiten des Wassers beidseits auf der Höhe der Absatzfugen, ohne Längsdrainageleitungen
- Gezieltes Fassen und Ableiten von konzentriert anfallendem Gebirgswasser im Bauzustand

Durch die Abdichtungsfolie wird das Gebirgswasser zwar abgehalten, wodurch die Forderung zur Vermeidung von Tropfwasser im Fahrraum ideal erfüllt wird, unerwünschte Wassertransportwege entlang der Tunnelverkleidung werden aber begünstigt, weil das Wasser durch die Folie verdrängt bzw. umgeleitet und nicht auf direktem Weg abgeleitet wird. Das an der Folie nach unten abfliessende Gebirgswasser kann ohne Längsdrainageleitung in der Absatzfuge nicht vollständig gefasst werden, es wird jedoch mit nur geringen Mengen gerechnet. Auf den Einbau einer Längsdrainage wird aus statischen (sehr hohe Quellbelastung) und unterhaltstechnischen Gründen verzichtet. Eine notwendigerweise unterhaltbare Leitung in der Absatzfuge müsste einen Durchmesser von 150 - 200 mm aufweisen, wodurch der statisch nutzbare Betonquerschnitt in der Fuge (Nut und Kamm) zu stark reduziert würde. Der Unterhalt von Leitungen aus dem Verkehrsraum ist gemäss Nutzungsplan nicht vorgesehen. Das im Tunnel anfallende Wasser wird in einem begehbaren Kanal unter den Gleisen gesammelt und Richtung Nordportal abgeleitet.

Bemessung des Tunnelprofils auf Quellen

Die angestellten Berechnungen haben gezeigt, dass für die Bemessung der Betonstärken der Tübbings wie auch des Ortbetoninnenringes der Lastfall «Quellendes Gestein» massgebend ist. Daneben wurden weitere Lastfälle untersucht, wie z.B. Handling der Tübbingelemente bei der

3
Profiltypen I und II



Produktion und den Zwischentransporten, Auflockerungsdruck auf den Tübbingring vor Einzug des Innengewölbes, Wasserdruck auf das Innengewölbe usw. In Zusammenarbeit mit dem Prüfingenieur, dem Bauherrn und dem Unternehmer wurden die maximalen Einwirkungen aufgenommen, diskutiert und im Sicherheits- und Nutzungsplan festgelegt. Zusätzlich wurden Gefährdungsbilder aufgestellt und deren Wahrscheinlichkeit und Folgen bewertet. Damit ist auch gesagt, dass gewisse Restrisiken in Kauf genommen werden mussten. Wichtig dabei ist, dass man sich dieser Restrisiken bewusst ist und entsprechende Kontroll- und Überwachungsmechanismen einschliesslich der notwendigen Massnahmen vorsieht.

Bemessungsgrundsätze

Bei Berücksichtigung der in den Labors gemessenen maximalen Quelldrücke von 6.0 MPa im Gipskeuper kann unter Einhaltung des in der SIA-Norm vorgegebenen Bruchsicherheitswertes als Produkt aus Lastfaktor und Widerstandsbeiwert nicht mehr wirtschaftlich dimensioniert werden.

Das Auftreten der im Labor gemessenen extremen Quelldruckwerte ist in natura kaum wahrscheinlich oder aber nur an vereinzelten Punkten und nicht über zusammenhängende längere Strecken. In der Natur herrschen nicht die für das Quellen idealen Bedingungen wie im Labor. So ist es nicht sinnvoll, diese hohen Werte noch mit einem Lastfaktor zu erhöhen; er wurde deshalb für die Extremwerte auf $\gamma = 1.0$ reduziert. Ein plötzliches Stabilitätsversagen ist ausgeschlossen, und mit einem entsprechenden Unterhaltsplan ist die Verkehrssicherheit jederzeit gewährleistet.

Im weiteren wird die Unsicherheit betreffend Last und Tragelement durch die Parameterstudie, in der Fels- und Betonkennwerte variiert werden, eingegrenzt. Da es sich bei den angegebenen Quelldruckwerten im Gipskeuper um eine Grenzbetrachtung auf maximalem Niveau handelt, wurde in Absprache mit dem Bauherrn vereinbart, dass die maximale Traglast des Tunneltragsystems gleich dem maximalen Quelldruck von 6.0 MPa als radiale Belastung auf die Sohle zu betrachten ist.

Als zusätzliche Bedingung wurde definiert, dass bei einem Quelldruck von 3.0 MPa eine mittlere Mindestsicherheit von 1.8 gegenüber der Traglast vorhanden sein soll. Diese Betrachtung wird durch weitere, nicht quantifizierte Reserven im Tragsystem unterstützt:

- Konservativ angenommene Bruchstauchung des Betons: Die Stauchungsmessungen an unter langjährigem Quelldruck belasteten Betonquerschnitten zeigen zum Teil eine hohe Duktilität des Betons, die über die Normbruchstauchung hinausgeht.
- Zunahme der Betonfestigkeiten im Laufe der Zeit: Messungen an Probekörpern aus älteren Tunnels zeigen eine Festigkeitszunahme des Betons, die höher als die Normangabe ist.

Berechnungsmodelle und Verfahren

Für die Bemessung des Tunnels wurden verschiedene Modelle und Verfahren verwendet sowie umfangreiche Parameterstudien durchgeführt, miteinander verglichen und interpretiert. Die Modellbildung für den Quelldruck auf ein Tunneltragwerk erweist sich als nicht ganz einfach, und es gibt denn auch verschiedene Möglichkeiten, das Problem zu lösen. Grundsätzlich gilt, dass ein Modell ein idealisiertes Abbild der Wirklichkeit sein und damit die komplizierten Vorgänge in der Natur auf vereinfachte Art nachvollziehbar machen soll. Modelle sollten neben dem Anspruch auf Realitätsnähe aber auch plausibel und durch unsere Beobachtungen in der Natur erhärtbar sein. Gerade das Gesteinsquellen stellt diesbezüglich einige Anforderungen, da die Abläufe im Gestein, die zum Quellen führen, und das Quellen selbst noch nicht restlos geklärt sind. Ist man bei der Erforschung des Tonquellens bereits sehr weit fortgeschritten, so sind bei der Erforschung des Gipskeuperquellens noch einige Fragen offen. Die Beobachtungen an bereits bestehenden Tunnels im Gipskeuper hat zum Modell des äusseren Lastangriffs geführt (4). Die Bettung des Tunneltragringes wird mittels radialer und tangentialer Federelemente modelliert.

Materialmodell

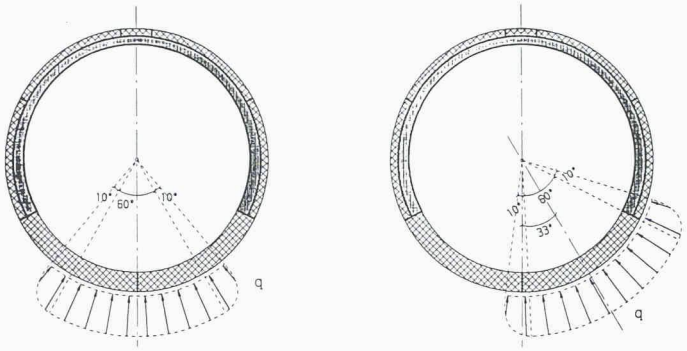
Für die Traglastberechnung wurde das Verhalten des Betons im Bruchzustand modelliert. Es wurden ein Zugversagen, die Risseentwicklung, das Druckversagen, der Einfluss des zweiaxialen Spannungszustands auf das Zug- und Druckversagen sowie die Änderung der Trageigenschaften des gerissenen Betons berücksichtigt. Die Risseentwicklung wurde mit Hilfe der nichtlinearen Bruchmechanik behandelt. Der angenommene Rechenwert der massgebenden Betonfestigkeit für die Beurteilung bei extremer Quellbelastung wurde grösser als der Normwert der gültigen SIA-Norm 162 gewählt. Die Erhöhung wird dadurch gerechtfertigt, dass kein eigentliches Traglastproblem oder gar plötzliches Stabilitätsversagen anzunehmen ist. Vielmehr handelt es sich darum, eine Prognose und Sensitivitätsanalyse für die Wirkungen unter den ungünstigen Quellbelastungen zu erstellen.

Die Betonfestigkeit bei der für die Dimensionierung massgebenden Quellbelastung hängt von verschiedenen wichtigen Faktoren ab, die einzeln untersucht und gewichtet wurden. In der wirklichen Tunnelverkleidung ist unwahrscheinlich, dass eine Stelle mit schlechter Betonqualität gerade mit einer Stelle extremer Quellbelastung zusammenfällt. Eine örtlich stark begrenzte Stelle schlechter Qualität hat einen geringen Einfluss, weil die benachbarten Bereiche mittragen. Im weiteren herrscht in den Betonelementen bei vermörtelten Längsfugen (Sohlbereich Gipskeuperstrecke) wegen dem Seitendruck in Axialrichtung ein zwei- und teilweise sogar ein dreiaxialer Spannungszustand mit grösseren Betonfestigkeiten. Da die maximale Quellbelastung in Wirklichkeit erst nach Jahren bis Jahrzehnten erreicht wird, können auch die Langzeiteinflüsse bei den Betonfestigkeiten berücksichtigt werden. Der im Vergleich mit der 28-Tage-Festigkeit bereits erwähnten höheren Betonfestigkeit steht eine Abminderung infolge der langfristig wirkenden Last gegenüber.

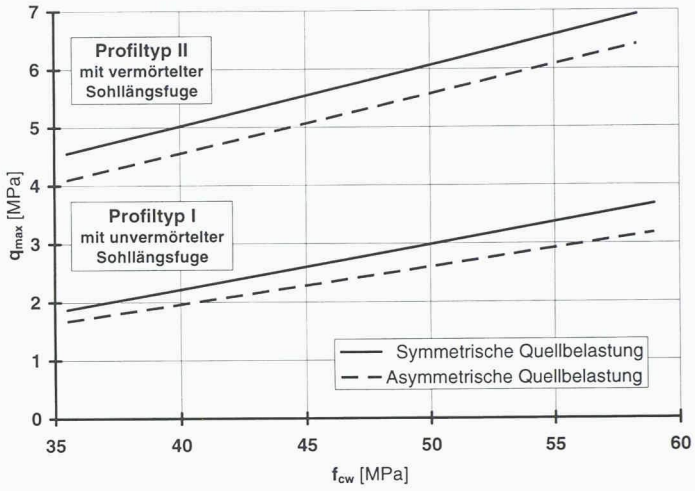
Resultate der Berechnungen

Die Traglastberechnungen zeigen, dass - wie erwartet - sich die massgebende Beanspruchung bei der Quellbelastung im Sohlbereich auf den Bereich der massiven Sohltübbings und die unteren Ulmentübbings konzentriert. Mit einer nicht-linearen Finite-Element-Berechnung, unter Berücksichtigung der realen Bogenwirkung des Gewölbes und der sukzessiven Entwicklung von Fugen- und Rissöffnungen bei der Laststeigerung war es möglich, das Verhalten der Tunnelverkleidungen wirklichkeitsnah zu erfassen. Der Quellwiderstand beträgt für den Profiltyp II auf Traglastniveau je nach Annahme der Rechenwerte 5.0 - 6.5 MPa und die zugehörige Verformung in der Sohle 50 - 70 mm. Auf Traglastniveau werden erhebliche Betonabplatzungen im Sohlbereich in Kauf genommen. Abplatzungen an der Innenseite des Sohlgewölbes treten bei einer Quellbelastung von ungefähr 4 MPa (Annahme: ab 4‰ Randstauchung) auf.

Das Tragverhalten und der Tragwiderstand bei symmetrischer und asymmetrischer Quellbelastung unterscheiden sich nicht wesentlich. Bei einer asymmetrischen Quellbelastung ist mit einer um nur rund 10% tieferen Traglast zu rechnen. Der Bruchbeginn bei der symmetrischen Quellbelastung erfolgt im oberen Drittel



4
Quelldruckmodellierung



5
Traglast in Funktion der Betondruckfestigkeit

5

der Sohltübbings am inneren Druckrand. Bei der asymmetrischen Quellbelastung tritt der Bruchbeginn oberhalb der Absatzfuge an der Innenseite der Innenschale ein. Bei der rundum durch den anstehenden Fels gestützten Tunnelverkleidung resultiert beim Erreichen des grössten Widerstands unter der Quellbelastung kein unerwartetes Versagen ohne vorhergehende grössere Verformungen. Die Nachgiebigkeit der Tunnelverkleidung bis zur Traglast ist jedoch nicht grösser als für die Aktivierung der steifen Felsbettung notwendig ist. Je steifer die Verkleidung unter der Quellbelastung ist, um so kleiner sind die für die Quellbelastung unerwünschten Felsauflockerungen.

Grosse Verformungen der Tunnelverkleidung mit starker Rissebildung und Betonabplatzungen sind ausserdem aus Gründen der Dauerhaftigkeit (Wirkung aggressiver Gebirgswässer) und den Auswirkungen der Deformationen auf den Innenausbau des Tunnels nicht erwünscht.

Aus (5) ist ersichtlich, dass sich die Traglast zur Druckfestigkeit und die verschiedenen Systeme (symmetrischer, asymmetrischer Quelldruck) untereinander praktisch linear verhalten. Hingegen verhält sich die Funktion Bettung zu Traglast annähernd logarithmisch; bei abnehmender Bettung sinkt auch die Traglast, da dann die Stützwirkung nachlässt.

Tübbings

Fugenform

Als Tübbingfuge wurden Flachfugen gewählt. Bei den hochbelasteten Sohltübbings hat diese Fugenform gegenüber Gelenkfugen einige wichtige Vorteile:

- Einfachere Schalungsauslegung
- Durch eine Mörtelzwischenlage in den Längsfugen werden Spannungskonzentrationen in der Kontaktfläche wirksam vermieden
- Einfachere und geringere Armierungsführung
- Nahezu ideales Tragverhalten; schon bei kleiner Verformung stellt sich eine angenäherte «Stützlinie» ein, bei geringer Rissebildung in den Tübbings.

Die Untersuchung einer Variante mit Gelenkfugen statt Flachfugen im Sohlbereich ergab unter grosser Quellbelastung ein ungünstigeres Tragverhalten. Der erreichbare Quellwiderstand ist bei einer Gelenkfuge etwas kleiner als bei einer Flachfuge und ist zudem mit grösseren Verformungen verbunden.

Armierung der Tübbings und des Innenringes

Die verschiedenen Berechnungen haben gezeigt, dass für die Bewehrung der Tübbings eine Minimalarmierung ausreicht. Für den Innenring ist keine Armierung erforderlich. Das Tragverhalten der Tunnelverkleidung bei der Quellbelastung im Sohlbereich erfolgt hauptsächlich durch Normalkräfte in Ringrichtung.

Sulfatresistenter Beton

Die SBB haben in Anbetracht der Problematik des Sulfatangriffs bei Tunnels im Juragestein ein grösseres Untersuchungsprogramm mitgetragen, das zum Ziel hatte, dem Sulfatangriff widerstehende Betonrezepturen zu definieren. Es hat sich dabei gezeigt, dass die blosse Verwendung von CA_3-armen Zementen bei höherer Sulfatbelastung keinen genügenden Widerstand gewährleistet. Die besten Resultate zeigten Mischungen mit Mikrosilica-Zugaben und tiefen W/Z-Faktoren. Solche Betonrezepturen kommen denn auch für die Tübbings und den Innenring beim Adlertunnel zur Anwendung.

Beschichtung der Tübbings

Um die Tübbings in der Zone des grössten zu erwartenden Quelldruckes eine gewisse Zeit noch besser vor Sulfat- und Chloridangriff zu schützen, werden die Betonelemente der Gipskeuperstrecke unmittelbar nach der Dampferhärtung allseitig mit einer Epoxydharz-Beschichtung versehen. Diese wasserdampfdurchlässige Beschichtung bietet neben dem dichten Beton eine weitere Sperre gegen eindringende Sulfat- und Chloridionen und unterstützt zudem eine optimale Nachbehandlung der gefertigten Tübbingelemente.

Zusammenfassung

Die aus der Geologie und Hydrologie resultierenden Anforderungen führten dazu, dass bei der Bemessung der Tragelemente (Tübbings und Innenring) des Adlertunnels zum Teil neue Wege begangen werden mussten. Die hohen zu erwartenden Quelldrücke erforderten ein Bemessungskonzept, das die gültigen SIA-Normen 160 und 162 teilweise verlässt. Mittels nichtlinearer Traglastberechnung konnte nachgewiesen werden, dass die zu erwartende Quellbelastung von den Tunneltragelementen aufgenommen werden kann. Sulfat- und Chloridbelastung haben zur Wahl von Betonrezepturen geführt, die bis anhin in diesem Umfang noch nie angewendet wurden. Dies stellt hohe Anforderungen an den ausführenden Unternehmer sowie an die Qualitätssicherung und verlangt einen für solche technische Neuerungen aufgeschlossenen Bauherrn.

Adresse der Verfasser:
Flavio Chiaverio, dipl. Ing. ETH/SIA, und *Daniel Hürzeler*, dipl. Ing. ETH/SIA, A. Aegerter & Dr. O. Bosshardt AG, Hochstrasse 48, 4002 Basel