

Bauwirtschaftlicher Vergleich der Baumethoden ADECO-RS und NÖT am Beispiel Tunnel Strengen

Von Harald Burgstaller, Bruno Mattle und Eckart Schneider

Seit den 90er-Jahren wird die von Professor Lunardi entwickelte Methode ADECO-RS in der Fachwelt intensiv diskutiert (2, 3). Ohne hier darauf eingehen zu wollen, wie weit die Bemessungsprinzipien dieser Methode – die einzige Messgröße, die zur Dimensionierung verwendet wird, ist die so genannte Extrusion (= horizontale Verformung der Ortsbrust) – den in einem tiefer liegenden Tunnel herrschenden komplexen Verhältnissen gerecht werden kann, ist festzustellen, dass diese Baumethode auch außerhalb Italiens zunehmend an Boden gewinnt. Wie weit dazu die scheinbare Simplizität und die geschickt gewählte Charakterisierung von ADECO-RS als „active approach“ beigetragen hat – im Gegensatz dazu bezeichnet Lunardi die NÖT als „passive approach“ –, bleibt dahingestellt.

Tatsache ist, dass ADECO-RS einen Kernsatz von L. Müller, nämlich die Forderung nach der Erhaltung des räumlichen Spannungszustands, äußerst konsequent umsetzt. Auch Kritiker können nicht bestreiten, dass sich die Methode bei mehreren schwierigen Tunnelbauten technisch bewährt hat. Als Beispiel sind hier die Tunnel

Monte Bibele und Tunnel Raticosa der Neubausstrecke Bologna-Florenz der italienischen Staatsbahnen zu erwähnen.

Unabhängig von der wissenschaftlichen und technischen Betrachtungsweise scheint es geboten, die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens zu untersuchen. Dazu gibt es bisher erst wenige Arbeiten (1). Die exorbitante Überschreitung der Kostenprognose und die Verdoppelung der geplanten Bauzeit für die Strecke Bologna-Florenz sind jedenfalls kein Indiz dafür, dass die Methode ADECO-RS besondere wirtschaftliche Vorteile bietet.

Ein wenig Licht in dieses Dunkel zu bringen, ist das Ziel der vorliegenden Arbeit. Sie beruht auf einer Diplomarbeit, die am Institut für Baubetrieb, Bauwirtschaft und Baumanagement der Fakultät für Bauingenieurwesen der Universität Innsbruck verfasst wurde (4). Der wirtschaftliche Teil wurde entsprechend den von Professor Schneider entwickelten Empfehlungen zur Kostenermittlung von Tunnelbauten (5) für die vorliegende Veröffentlichung überarbeitet und aktualisiert.

Economical Comparison of ADECO-RS and NATM Based on the Example Tunnel Strengen

ADECO-RS a new method of tunnelling developed by Professor Lunardi is considered as a serious alternative to the NATM even in Austria. FELSBAU has given special attention to this topic in its august 2004 issue. Of particular interest in this context is an article by Marcher, Starjakob, Lutz and Sotek (1) which – apart from the technical aspects – contains a comparison of the two methods under construction management and cost aspects. Whereas their comparison for a three lane road tunnel was elaborated during the tender phase, the topic of the article in hand is an economical evaluation of a project already completed. It deals with the Strenger Tunnel, a twin-tube highway tunnel with two by two lanes. The technical aspects of this project have been published in FELSBAU 1/2004. Squeezing conditions were encountered (radial deformations up to 70 cm) over one third of its length. The idea of the authors was to carry out the tunnel design by the ADECO-RS method and compare its costs with the costs related to the NATM method. The calculation of both estimates follows the same principles and uses the same methods and basic values. Before entering the cost estimating process it was necessary to dimension the support and lining of the ADECO-RS alternative. For this purpose the actual rock parameters were determined from the measured convergences by back analysis. The comparison of costs for the Strenger Tunnel results in significant advantages for the NATM.

Die von Professor Lunardi entwickelte Methode ADECO-RS wird mittlerweile auch von den österreichischen Tunnelbauern als durchaus ernstzunehmende Konkurrenz zur NÖT gesehen. Die Zeitschrift FELSBAU hat im Rahmen einer Gegenüberstellung von Vortriebsmethoden im August 2004 schwerpunktmäßig über ADECO-RS berichtet. Interessant ist darin unter anderem ein Beitrag von Marcher, Starjakob, Lutz und Sotek (1), der neben den technischen Aspekten auch einen baubetrieblich-bauwirtschaftlichen Vergleich beinhaltet. Der Vergleich wurde im Zuge der Angebotsbearbeitung für einen Straßentunnel mit drei Fahrspuren durchgeführt.

Der vorliegende Beitrag hat den bauwirtschaftlichen Vergleich der beiden Methoden – NÖT versus ADECO-RS – für ein bereits ausgeführtes Projekt zum Inhalt. Dabei handelt es sich um den Strenger Tunnel, einen Straßentunnel mit zwei zweispurigen Röhren. Über die bautechnischen Schwierigkeiten bei der Auffahrung dieses tiefliegenden Lehnentunnels wurde im FELSBAU-Heft 1/2004 ausführlich berichtet. In der vorliegenden Arbeit wird dieser Tunnel zu Vergleichszwecken nach der Methode ADECO-RS geplant, die kalkulativen ermittelten Kosten beider Verfahren werden verglichen. Dazu wurden aus den gemessenen Verformungen die Gebirgsparameter zurückgerechnet und anschließend der Ausbau nach der Methode ADECO-RS bemessen. Der Vergleich der beiden Baumethoden fällt beim Projektbeispiel eindeutig zu Gunsten der NÖT aus.



BVH: Wr. Linien, Baulos U2/1
Herstellen von Vereisungsbohrungen
mit einer Tiefe von 40 m und einer
Bohrabweichung kleiner 1%



Grund- Pfahl- und Sonderbau GmbH

A-2325 Himberg bei Wien,
Industriestraße 27a
Tel.: +43/(0)2235/87777-0
Fax: +43/(0)2235/86561
e-mail: office@gps-bau.com
<http://www.gps-bau.com>

Filialen:

A-6850 Dornbirn,
Lustenauerstraße 56
Tel.: +43/(0)5572/398855
Fax: +43/(0)5572/386279
e-mail: gps-dornbirn@gps-bau.com

A-6175 Kematen in Tirol,
Messerschmitzweg 13
Tel.: +43/(0)5232-3333-122
Fax: +43/(0)5232-2617
e-mail: gps-fst-kematen@gps-bau.com

Spezialtiefbau:

Rohrschirmarbeiten - Vereisungsbohrungen
Bauherrenberatung - Komplette Baugrubenlösungen
Baugrubensicherungen - Bodenvernagelungen - DSV
Felssicherungen und Arbeiten im hochalpinen Gelände
Mauersanierungen - Spritzbetonarbeiten - Injektionen
Ankerungsarbeiten - Kleinbohrpfähle - Sprengarbeiten
Großbohrpfähle - Ramppfähle Zeissl - Duktile Pfähle
Aufschlussbohrungen - Brunnenbau - Wasserhaltung
Schlitzwände - Schmalwände - Dichtungswände
Vorspannarbeiten - Sondertechnik - Pfahlprüfungen TNO



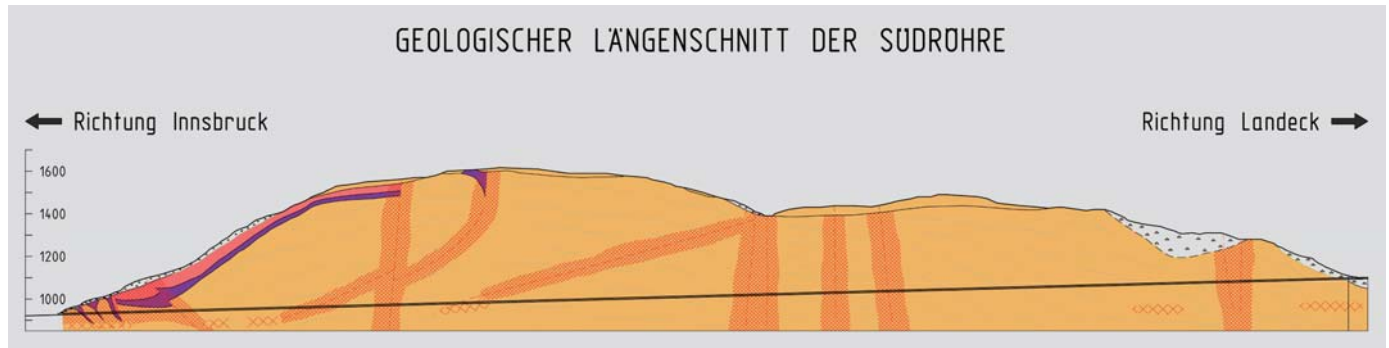


Bild 1 Geologischer Längenschnitt der Südröhre (7).

Fig. 1 Geological longitudinal section of the southern tube (7).

Beschreibung des Projekts Strenger Tunnel

Der Strenger Tunnel schließt die Lücke der Arlbergschnellstraße zwischen Flirsch und Pians. Aufgrund der erwarteten Verkehrsbelastung und der vorhandenen Steigungsverhältnisse erfolgt der Ausbau mit zwei zweispurigen Tunnelröhren im Richtungsverkehr. Die Längen der Tunnelröhren betragen 5 851 m für die Nordröhre und 5 775 m für die Südröhre (6).

Geologische Verhältnisse

Das Gebirge zwischen Strengen und Pians besteht aus den Gesteinen des Landecker Quarzphyllits. Er setzt sich hauptsächlich aus Quarzphylloniten und phyllonitischen Glimmerschiefern zusammen. Schmale Züge von Albitchlorit-schiefern, Hornblendeschiefern und stark verschieferte Muskovitgranitgneisen sind im Landecker Quarzphyllit eingelagert. Im Osten sind metamorphe Sedimentgesteine eingeschuppt.

Die im Landecker Quarzphyllit als Folge der intensiven tektonischen Beanspruchung verlaufenden zahlreichen Störungen sind häufig mylonitisiert und werden vom Tunnel schleifend geschnitten. Die ungünstige Raumstellung der Haupttrennflächen mit steilem, vorwiegend Südeinfallen und spitzwinkligem bis parallelem Streichen zur Tunnelachse führte vor allem im Zentralbereich zu stark druckhaftem Gebirgsverhalten.

Das Gebirge ist insgesamt nur gering wasserführend. Bild 1 zeigt den geologischen Längenschnitt der Südröhre. Da die Geländeoberfläche des vom Strenger Tunnel betroffenen Gebiets durch ausgedehnte Hangbewegungen geprägt ist, wurde die Trasse von den Portalen weg in einem großen Bogen so weit wie möglich in den Berg hinein gelegt.

Vortriebskonzept

Die zwei Röhren des Strenger Tunnels wurden im Kalotten-Strossen-Sohlvortrieb gleichzeitig von Osten und Westen her aufgeföhren. Gemäß den Prinzipien der NÖT wurde der Erstausbau nachgiebig gestaltet. Im Regelfall bestand er aus einer Spritzbetonsicherung, Tunnelbögen und einer Systemankerung. Für die druckhaften Strecken wurde die Spritzbetonschale mit Schlitz- unterbrochen, die mit Stauelementen aus-

gebaut wurden. Trotz dieses sehr verformungs-fähigen Ausbaues entstanden wegen der großen Konvergenzen Schäden in der Außenschale die umfangreiche Nachprofilierungs- und Überfir-sungsarbeiten notwendig machten.

Vorentwurf für den Strenger Tunnel nach ADECO-RS

Um einen bauwirtschaftlichen Vergleich der beiden Methoden durchführen zu können, war es notwendig, für den Strenger Tunnel einen Vorentwurf nach der Methode ADECO-RS zu erar-beiten. Es wurde versucht, auf möglichst einfachen und praxisnahem Weg die von Lunardi (8) vorgeschlagene Methodik zur Planung umzusetzen. Dieser Vorentwurf und die Unterlagen der Planung nach der NÖT sowie die Aufzeichnungen über die Baudurchführungen dienten als Grundlage für den Vergleich. Die folgenden Abschnitte – benannt nach den Planungsphasen der Methode ADECO-RS – beschreiben die einzelnen Schritte, die für den Vorentwurf des Projektbeispiels erforderlich sind.

Erkundungsphase

Die Erkundungsphase dient der Ermittlung der geologisch-geotechnischen Situation und Abschätzung des Primärspannungszustands. Als Grundlage konnten neben den bereits vorhandenen Planungsunterlagen die Aufzeichnungen der Verformungsmessungen und der Geologie herangezogen werden. Die Erkundungsphase beschränkte sich folglich auf das Beschaffen und Sichten der vorhandenen Aufzeichnungen, Berichte und Pläne.

Diagnosephase

Ziel dieser Phase ist es, den aufzuföhrenden Tunnel in Abschnitte mit gleichem Spannungs- und Verformungsverhalten einzuteilen. Nach Lunardi erfolgt diese Einteilung nach Größe und Verlauf der berechneten Extrusionsverformungen ohne Stützmittel. Die Extrusion stellt die Längsverschiebung des Gebirges vor der Orts-brust dar. Da zwischen dieser und der Konvergenz des Hohlraums nach Lunardi (8) ein direkter Zusammenhang besteht, wurde auf eine Berechnung der Extrusion ohne Stützmittel verzichtet und eine Einteilung in Vortriebsabschnitte nach der Größenordnung der tatsächlich ge-

messenen Firstsetzungen vorgenommen. Ergebnis war eine Einteilung der Vortriebe in Abschnitte mit gleichem Verformungsverhalten.

Durch Vergleichsrechnungen an rotations-symmetrischen FEM-Modellen wurde festgestellt, dass in Abschnitten bis zu 50 mm Firstsetzungen die Stabilität der Ortsbrust keine Probleme bereitet und diese somit gemäß der Vorgangsweise nach ADECO-RS der Kategorie A (stabile Ortsbrust) zugeordnet werden können. Abschnitte mit Verformungen zwischen 50 und 100 mm wurden der Kategorie B (kurzzeitig stabile Ortsbrust) zugeordnet und Abschnitte mit Firstsetzungen größer 100 mm der Kategorie C (instabile Ortsbrust). Eine weitere Verfeinerung der Unterteilung führte zu sechs unterschiedlichen Kategorien (Tabelle 1) und 49 Vortriebsabschnitten für beide Tunnelröhren. Beim tatsächlichen NÖT-Vortrieb traten aufgrund der Orientierung des Trennflächengefüges kaum Instabilitäten in der Ortsbrust auf. Die Annahme homogener, isotroper Gebirgseigenschaften für die Berechnungen stellt damit eine Näherung dar.

Therapiephase

In dieser Phase werden die Stützmittel ausgewählt und dimensioniert. Für die Dimensionierung der Stützmittel nach ADECO-RS wurden für jede Kategorie die Gebirgsparameter bestimmt. Als Grundlage diente dabei die Planung für den NÖT-Vortrieb.

In einem ersten Schritt wurden für Überlagerungshöhen von 50, 300 und 600 m aus den einaxialen Gesteinsfestigkeiten und den Hoek-Brown-Parametern (9) (GSI, mi und D) mithilfe des Programms RocLab die Festigkeitsparameter (Kohäsion und Reibungswinkel) sowie der E-Modul berechnet. Diese wurden für die ausgewählten Bemessungsquerschnitte mittels Kennlinienverfahren (10) unter Berücksichtigung des tatsächlichen Ausbauwiderstands verfeinert.

Üblicherweise werden zur Ermittlung der Ortsbruststützung Berechnungen an axialsymmetrischen oder dreidimensionalen Modellen durchgeführt, oder es kommen Laborversuche

Tabelle 1 Kategorien, Einteilungskriterien und Vortriebslängen je Kategorie.

Tab. 1 Categories, criteria for subdivision and total length of advance per category.

Kategorie	Firstsetzungen bis zu [mm]	Überlagerung bis zu [m]	Summe der Abschnittslängen [m]
A	50	600	7 245
B1	100	450	480
B2	100	600	1 620
C1	200	600	1 711
C2	400	600	470
C3	> 400	600	100

zur Anwendung. Im vorliegenden Fall sind axial-symmetrische Berechnungen wegen der Orientierung des Trennflächengefüges nur bedingt anwendbar. Dreidimensionale Berechnungen oder Laborversuche schieben wegen des großen Aufwands aus. Es wurde daher ein Verfahren basierend auf Untersuchungen von Poisel und Zettler (11) verwendet. Mithilfe des Faktors λ_r , der die Größe der plastischen Zonen vor der Ortsbrust beschreibt, wird die Notwendigkeit einer Ortsbruststützung untersucht. Bei der Ermittlung des Faktors λ_r werden die Primärspannung, die Kohäsion und der Reibungswinkel berücksichtigt. Bei der Beurteilung der Ortsbruststabilität sind drei Fälle von Interesse:

- ▷ $\lambda_r < 0,3$: Die Ortsbrust befindet sich völlig in der plastischen Zone, die Stabilität der Ortsbrust wird kritisch,
- ▷ $0,3 \leq \lambda_r \leq 0,6$: Die Ortsbrust ist teilweise in der plastischen Zone, die Stabilität der Ortsbrust kann kritisch werden,
- ▷ $\lambda_r > 0,6$: Die Ortsbrust ist elastisch, plastische Zonen entwickeln sich hinter der Ortsbrust unter der Voraussetzung, dass ein genügend steifer Ausbau nah genug an der Ortsbrust eingebaut wird.

Für die Rechenquerschnitte der Kategorie C3 wurde ein $\lambda_r = 0,45$ ermittelt. Nach Cosciotti (12) gilt, dass ab einer Ankerdichte von 0,8 Anker/m² keine wesentliche Steifigkeitssteigerung des Vortriebskerns im Verhältnis zum Aufwand erzielt werden kann. Für die Vordimensionierung wurde angenommen, dass eine Ankerdichte von 0,8 Anker/m² einem $\lambda_r = 0,45$ zugeordnet werden kann. Diese Ankerdichte ergibt eine Anker-

Schulwaldtunnel (4 500m):

- Geotechnische Fachbauleitung
- Hydrogeologische Beratung
- Grundwasserabsenkung

Tunnel Eichen Diekenscheid (400m):

- Ausführungsplanung
- Geotechnische Fachbauleitung
- Geologische Dokumentation

Tunnel Dernbach (3 300m) und

Tunnel Deesener Wald (1 270m):

- Geologische Dokumentation
- Hydrogeologische Beweissicherung

Tunnel Strengen (5 850m):

- Baugeologische Tunneldokumentation und Beratung
- Geotechnische Messgeräte
- Gebirgsklassifizierung

Tschirgantunnel (4 500m):

- Baugeologisch-geotechnische Erkundung
- Vorprojekt mit Trassenauswahl
- Einreichprojekte für die Behördenverfahren (UVE, UVP)
- Ausschreibungsplanung
- Ausführungsplanung

INTERGEO
Consultants

A-5020 Salzburg
Robinigstraße 93
Tel.: ++43 / 6 62 / 45 50 07-0
Fax: ++43 / 6 62 / 45 73 16
email: office@intergeo-consulting.com

Ingenieurgeologie • Geotechnik • Hydrogeologie • Hohraumbau • TBM-Prognosen • Planung • Statik • Bauüberwachung • Begleitende Kontrolle • Labor • Lärm

anzahl von 90 Anker. Für alle anderen Bemessungsfälle wurde die Anzahl der Anker abhängig von λ_r linear interpoliert.

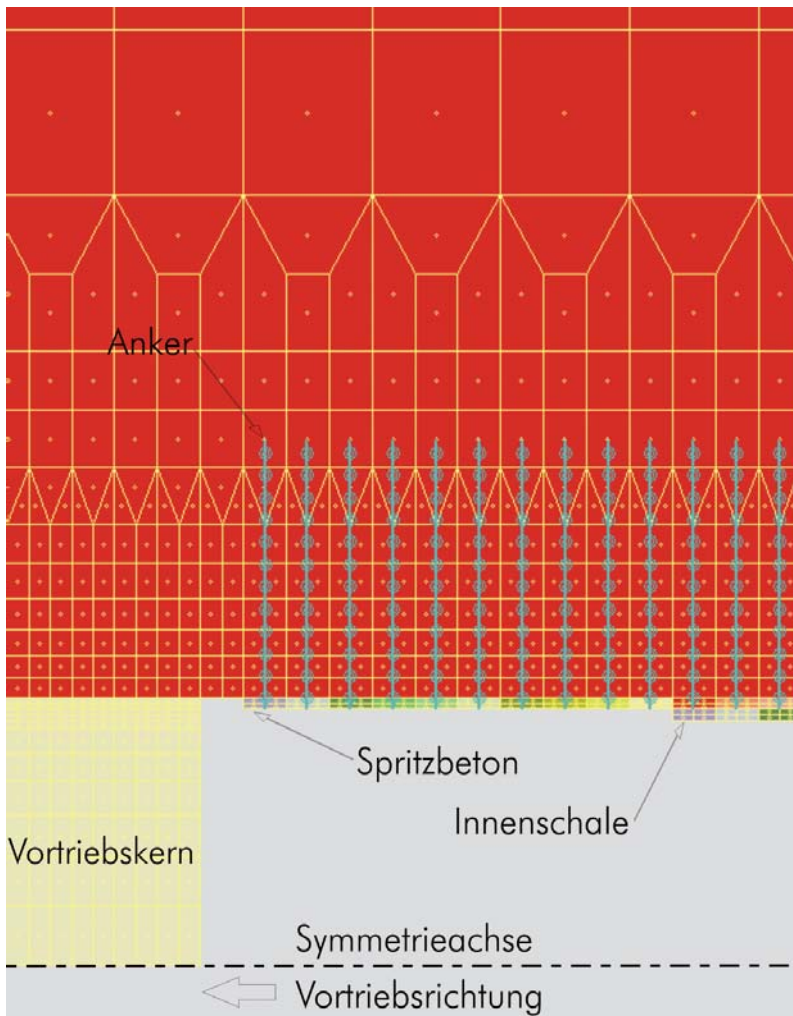
Im nächsten Schritt wurde festgelegt, in welchen Kategorien radiale Gebirgsanker eingesetzt werden müssen. Von Lunardi wird für die Kategorien A und B1 eine radiale Gebirgsankerung vorgeschlagen. Dieser Vorschlag wurde übernommen, und für den ADECO-RS-Vortrieb wurde eine Ankerung vorgesehen, wie sie beim NÖT-Vortrieb ausgeführt wurde.

Die Dimensionierung der Spritzbeton- und Außenschale erfolgte an einem axialsymmetrischen FEM-Modell mit dem Programmsystem Z-Soil. Die Berechnungsannahmen waren:

- ◇ Das Gebirge verhält sich homogen und isotrop und wird durch die Mohr-Coulombsche Versagshypothese beschrieben.
- ◇ Das Verhalten von Spritzbeton und Innenschalenbeton ist linear-elastisch. Die Nachgiebigkeit von jungem Beton wird durch Reduzieren des E-Moduls modelliert.
- ◇ Das Stoffgesetz der Gebirgsanker ist linear-elastisch, ideal-plastisch. Sie werden gleichmäßig über den Umfang verteilt berücksichtigt (Axialsymmetrie).
- ◇ Die Wirkung der Ortsbrustanker wird durch eine Kohäsionserhöhung des geankerten Bereichs erfasst.

Bild 2 Ausschnitt des verwendeten FEM-Modells.

Fig. 2 Detail of FEM-model.



Um der unterschiedlichen Form des Kreisprofils im Berechnungsmodell und dem tatsächlich aufzufahrenden Maulprofil Rechnung zu tragen, wurde die Steifigkeit der Außen- und Innenschale entsprechend reduziert. Der Reduktionsfaktor wurde anhand einer Querschnittsuntersuchung aus dem Vergleich der Firstsetzungen beider Profile unter der Einheitslast ermittelt. Ein Ausschnitt des verwendeten FEM-Modells ist in Bild 2 dargestellt.

Die Spritzbetonschale wurde gemäß dem Vorschlag von Rokahr und Lux (13) nach ihrem Arbeitsvermögen, das heißt ihren maximal aufnehmbaren Stauchungen bemessen. Demnach sollte junger Spritzbeton eine Stauchung bis zu 1,2 % ohne Brucherscheinungen aufnehmen können. Bestätigt wird dieser Wert durch die Verformungsmessungen in den Vortrieben, die auf aufnehmbare Stauchungen bis zu 1,8 % schließen lassen. Für die Bemessung wurde die maximale zulässige Stauchung mit 1,2 % festgelegt. Als maximale Vortriebsicherung wurde eine Spritzbetonschale mit 45 cm Dicke kombiniert mit zwei HEB 300 Stahlprofilen angenommen. Konnte mit dieser Sicherung ein Abklingen der Verformungen rechnerisch nicht nachgewiesen werden, wurde die Innenschale sofort eingebaut. Bild 3 zeigt ein Bemessungsdiagramm für einen B2-Querschnitt.

Der E-Modul des jungen Spritzbetons wurde für das Alter von 24 h mit $E_1 = 7\,500\text{ N/mm}^2$ und für ein Alter von 48 h zu $E_2 = 15\,000\text{ N/mm}^2$ festgelegt (14). Es wurde davon ausgegangen, dass die mittlere Vortriebsgeschwindigkeit bei einem Abschlag pro Tag liegt.

Die Innenschale wurde ähnlich wie die Spritzbetonschale über das Arbeitsvermögen dimensioniert. Die zulässigen Stauchungen ergeben sich aus der nach ÖN B 4700 maximal erlaubten Betonstauchung von $\epsilon_B = 3,5\text{ ‰}$ und einer möglichen Kriechdehnung nach ÖN B 4750 mit $\epsilon_K = 7\text{ ‰}$ zusammen $\epsilon_{zul} = 10,5\text{ ‰}$. Da die Innenschale nach der Methode ADECO-RS relativ nahe an der Ortsbrust eingebaut wird, ist davon auszugehen, dass auch diese früh belastet wird. Der E-Modul wurde in derselben Art reduziert wie für den jungen Spritzbeton. Die ermittelten Stärken der Innenschale reichen von 30 cm für die Kategorie A bis zu 130 cm für die Kategorie C3. Der Abstand zwischen Innenschale und Ortsbrust lässt sich mit dem oben beschriebenen Modell nicht ermitteln, da für die Betone und das Gebirge kein rheologisches Materialmodell verwendet wurde. Für die Leistungsermittlung wurden die Abstände der Innenschale wie folgt festgelegt:

- ◇ Kategorie A fünf Tunneldurchmesser,
- ◇ Kategorie B drei Tunneldurchmesser,
- ◇ Kategorie C ein Tunneldurchmesser.

Nicht berücksichtigt wurden für ADECO-RS mögliche Sanierungen der stark belasteten, steifen Spritzbetonschale und langfristig ein Ausfallen der Erstsicherung.

Bauwirtschaftlicher Vergleich

Grundsätzliches

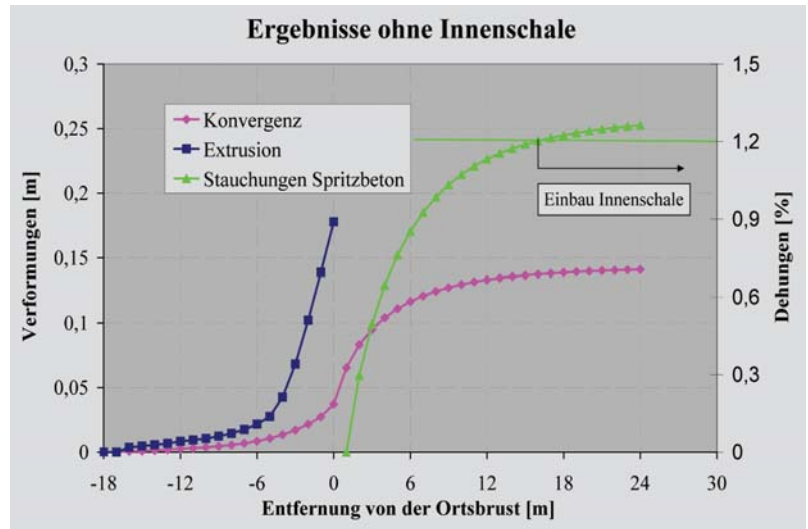
Möchte man die Kosten unterschiedlicher Verfahren für die Herstellung eines Tunnels vergleichen, sollte die Kostenermittlung immer nach der gleichen Methode erfolgen. Wenn für ein Verfahren (ADECO-RS) keine gesicherte Datenbasis über die Kosten verfügbar ist, ist es zweckmäßig, die Kostenermittlung nach der Kalkulationsmethode durchzuführen (5). Wesentlich ist auch, dass die Kostenermittlung für beide Verfahren gleich strukturiert wird. Baustellengemeinkosten und Einzelkosten der Teilleistungen sollten unbedingt getrennt ermittelt werden. Diese Unterteilung dient der Transparenz.

Der vorliegende bauwirtschaftliche Vergleich wurde entsprechend diesen Grundsätzen durchgeführt. Von einer detaillierten Kalkulation der Baustellengemeinkosten wurde allerdings abgesehen, sie wurden für beide Verfahren in gleicher Höhe mit 12 % der Basiskosten der jeweiligen Variante angesetzt. In diesem Prozentsatz sind neben den zeitgebundenen Bauführungskosten auch die einmaligen Kosten für Baustelleneinrichtung und Räumung enthalten. Die allgemeinen Geschäftskosten, Wagnis und Gewinn wurden mit einem Endzuschlag von 8 % berücksichtigt.

Einteilung in Vortriebsklassen

In der Terminologie von ADECO-RS gibt es keine Vortriebs- oder Ausbruchklassen, sondern Kategorien. Beim Strenger Tunnel wurden die Kategorien A, B1, B2, C1, C2 und C3 verwendet. Für die NÖT-Variante wurde die Vortriebsklasseneinteilung gemäß ÖN B 2203 (1994) verwendet. Gemäß den während des Vortriebs angetroffenen Gebirgsverhältnissen kamen die Klassen TK 5-X, TK 6-X, TK 7-X und TK 7-X-V zur Anwendung. Für die Kostenermittlung wurden die in der Kalotte, Strosse und Sohle angetroffenen Klassen entsprechend den auf der Baustelle getroffenen Ausbaufestlegungen zu Grunde gelegt. Die in den druckhaften Strecken des Strenger Tunnels durchgeführten umfangreichen Nachprofilierungs- und Rekonstruktionsarbeiten an der Außenschale wurden bei der NÖT-Variante im tatsächlich durchgeführten Ausmaß in die Ermittlung der Kosten und der Bauzeit einbezogen. Bei ADECO-RS wurden keine derartigen Arbeiten in Ansatz gebracht.

Die Ausbaufestlegungen in den Kategorien nach ADECO-RS und die Ausbaufestlegungen nach NÖT sind nicht direkt vergleichbar, da die Wahl der notwendigen Stützmaßnahmen für beide Methoden auf unterschiedlichem Weg und aufgrund unterschiedlicher Annahmen erfolgt. Deshalb sind zum Beispiel die Regelstützmaßnahmen der Vortriebsklasse TK X-5 nicht als genaues Pendant zu den Maßnahmen der Kategorie A anzusehen.



Ermittlung der Vortriebsgeschwindigkeit

Die Ermittlung der Vortriebsgeschwindigkeit erfolgte für beide Varianten über eine Zyklusbetrachtung. In die Berechnung flossen die von der Vortriebsklasse beziehungsweise Kategorie abhängige Abschlagslänge, der Ausbruchquerschnitt und der Zeitbedarf für den Stützmitteleinbau ein. Für beide Varianten wurden soweit wie möglich dieselben Aufwands- und Leistungswerte verwendet.

Die Dauer eines kompletten Abschlagszyklus setzt sich aus den Teildauern für Ausbruch, Schutterung, Stützmitteleinbau, Vor- und Nebenarbeiten wie Ablauten, Sprengen und Lüften, geologische Aufnahme und Vermessung plus einem prozentualen Zuschlag für Störungen zusammen. Aus der Dauer eines Abschlags lässt sich die Anzahl der Abschläge pro Arbeitstag (24 h) und daraus die Vortriebsgeschwindigkeit (m/AT) berechnen. Für die NÖT-Variante entspricht sie im Wesentlichen den garantierten Vertragsleistungen. Zusätzlich wurden bei der NÖT-Variante die Sanierungsmaßnahmen, die hauptsächlich in der schwersten Vortriebsklasse angefallen sind, berücksichtigt (50 beziehungsweise 100 % des Kalottenumfangs).

In gleicher Weise wurde die Vortriebsgeschwindigkeit für die verschiedenen Kategorien der ADECO-RS-Variante ermittelt. Zur Überprüfung der Plausibilität wurden die kalkulativ ermittelten Werte mit Erfahrungswerten von der Neubaustrecke Bologna-Florenz verglichen.

Die Leistungen je Vortriebsklasse für die NÖT sind in Tabelle 2 zusammengefasst. Die Werte der „Vortriebsleistung gesamt“ und der „Leistung gesamt“ sind theoretischer Natur, sie werden aber aus systematischen Gründen zum Vergleich mit ADECO-RS angeführt. In der Praxis wird bei langen Tunneln, die nach NÖT aufgeföhren werden, die Strosse meist parallel (nachteilend) zur Kalotte ausgebrochen. Dasselbe gilt zumindest teilweise für den Sohlvortrieb. Die Herstellung der Widerlager erfolgt voraussend zum Betonieren der Innenschale, die bei langen Tunneln ebenfalls nachteilend zum Vortrieb her-

Bild 3 Bemessungsdiagramm für einen B2-Querschnitt.

Fig. 3 Diagram for the structural design of a B2 section.

Tabelle 2 Zusammenfassung der Leistungen (lfm/AT) für den NÖT-Vortrieb.**Table 2** Summary of the construction performance (m/d) for the NATM advance.

Vortriebsklasse	TK 5-X	TK 6-X	TK 7-X	TK 7-X-V	TK 7-X-V SK 50 %	TK 7-X-V SK 100 %
Vortriebsleistung Kalotte	6,2	5,0	4,0	3,1	2,9	2,3
Vortriebsleistung einschließlich Sanierungsarbeiten	6,2	5,0	4,0	3,1	1,9	1,2
Vortriebsleistungen Strosse	13,6	11,6	9,4	7,7	7,7	7,6
Vortriebsleistungen gesamt	4,3	3,5	2,8	2,2	1,5	1,0
Leistung Sohle und Widerlager	40,0	22,3	22,3	11,0	8,6	8,6
Leistung Innengewölbe	12,8	12,6	12,5	12,3	12,1	11,8
Leistung gesamt	3,1	2,7	2,3	1,8	1,4	0,9

Tabelle 3 Zusammenfassung der Leistungen (lfm/AT) für den Vortrieb nach ADECO-RS.**Table 3** Summary of the construction performance (m/d) for the ADECO-RS advance.

Kategorie	A	B1	B2	C1	C2	C3
Vortriebsleistung	4,4	2,6	2,0	2,6	1,8	1,8
Leistung Sohle und Widerlager	17,3	17,3	17,2	15,8	3,4	3,3
Leistung Innengewölbe	12,7	12,5	12,4	11,5	9,5	8,5
Leistung gesamt	3,9	2,4	1,9	2,4	1,2	1,1

Tabelle 4 Mannschaftsstärken.**Table 4** Manpower.

Vorgang	Mannstärke
NÖT	
Kalottenvortrieb	6 Mann
Strossenvortrieb	4 Mann
Ausbruch und Ausbau Sohle	4 Mann
Innengewölbe	6 Mann
ADECO-RS	
Vortrieb	7 Mann
Endgültiger Ausbau	10 Mann

gestellt wird. Für die Kostenermittlung wurde nicht die Gesamtleistung verwendet, sondern die Leistungen der Hauptarbeiten und die daraus abgeleiteten Zeitdauern.

Die Leistungen je Kategorie für die Methode ADECO-RS zeigt Tabelle 3. Bei den angeführten Leistungen handelt es sich um echte Werte, welche die reale Vortriebs- beziehungsweise Herstellgeschwindigkeit wiedergeben.

Ermittlung der Einzelkosten

Die Ermittlung der Lohnkosten erfolgte gesondert für den Ausbruch – unterteilt nach Kalotte, Strosse und Sohle – sowie für die Betonarbeiten, die in Sohle, Widerlager- und Innenschalenarbeiten unterteilt wurden.

In der Tabelle 4 sind die angesetzten Mannschaftsstärken beider Methoden wiedergegeben.

Tabelle 5 Gegenüberstellung der Gesamtkosten.**Table 5** Comparison of total costs.

	Gesamtkosten [EUR]	Mittlere Kosten je lfm [EUR/lfm]
NÖT	103 319 478	9 079
ADECO-RS	192 218 851	16 891

Der Bruttomittellohn wurde für beide Varianten mit 30 EUR (ohne Endzuschlag) angesetzt.

Die Stoffkosten wurden ebenfalls kalkulatativ, und zwar getrennt nach Vortriebsklassen, ermittelt. Sie setzten sich zusammen aus den Kosten für Verschleißmaterial, Spreng- und Zündmittel, Arbeitskleidung, Beleuchtung, Kleinmaterial, elektrische Energie, Treibstoff, Schmiermittel und Baustoffe wie Anker, Ankermörtel, Spritzbeton, Tunnelbögen, Baustahlgitter und Stauchelemente.

Die Gerätekosten wurden auf Basis der ÖBGL 92 mit reduzierten Sätzen, und zwar mit 60 % für Abschreibung und Verzinsung und auf 50 % für Reparatur, ermittelt (kein Zuschlag für Mehr- und Schichtarbeit). Als Einsatzzeit wurde die kalkulatativ ermittelte Vorhaltdauer angesetzt.

Wassererschwernisse und Entwässerungsarbeiten wurden ausgeklammert, weil davon ausgegangen werden kann, dass diese Teilleistungen bei beiden Varianten annähernd gleiche Kosten verursachen. Die Kostenberechnung erfolgte unter Vernachlässigung der Voreinschnitte, Nischen und Aufweitungen sowie der Querschläge.

Tabelle 5 zeigt eine Gegenüberstellung der Gesamtkosten.

Zusammenfassung und Kommentar

Vortriebsgeschwindigkeit/Bauzeit

Wie bereits zuvor erläutert wurde, können die Vortriebsgeschwindigkeiten der beiden Varianten (vgl. Tabellen 2 und 3) nicht direkt miteinander verglichen werden, weil bei der NÖT die Geschwindigkeit des Kalottenvortriebs maßgeblich für die Vortriebsdauer ist. In langen Tunneln werden die übrigen Ausbrucharbeiten meistens parallel mit einem mehr oder weniger großen Nachlauf durchgeführt. Dasselbe gilt für die Auskleidung. Dadurch kann die Bauzeit wesentlich verkürzt werden. Das war auch beim Strenger Tunnel der Fall.

Bei ADECO-RS können die Hauptarbeiten nur nacheinander durchgeführt werden. Der Ausbruch kann zum Beispiel erst nach Abschluss der Ankerungsarbeiten in der Ortsbrust erfolgen. Zum Einbau der Innenschale müssen die

Vortriebsarbeiten unterbrochen werden. Einzig und allein die Sohle kann bei Einsatz von Brückenkonstruktionen parallel zu anderen Arbeiten hergestellt werden – allerdings nur dann, wenn sie im relativ großem Abstand zur Ortsbrust eingebaut wird.

Ein realistischer Bauzeitvergleich wäre nur über einen Bauzeitplan möglich, der alle Bauvorgänge beinhaltet. In der Diplomarbeit, die diesem Artikel zu Grunde liegt, wurde der Vergleich auf Basis theoretischer Leistungen durchgeführt und ergab folgendes Ergebnis:

Für die jeweils günstigste Klasse ist die Vortriebsgeschwindigkeit bei beiden Methoden ungefähr gleich. In den mittleren Klassen ist der Vortrieb nach NÖT zum Teil deutlich schneller. In den schlechteren Klassen, und zwar insbesondere wenn bei der NÖT Nachprofilierungs- und Rekonstruktionsarbeiten notwendig waren, sind die Vortriebsleistungen nach ADECO-RS höher. Diese Aussagen sind qualitativ, da die Arbeitsabläufe der beiden Methoden sehr verschieden sind.

Bei der Herstellung der Innenschale ist die NÖT eindeutig schneller. Dies gilt insbesondere dann, wenn bei ADECO-RS die Sohle gleich hinter der Ortsbrust eingebaut werden muss und die Stärke des Innengewölbes zunimmt. Weil im Strenger Tunnel die schlechten Vortriebsklassen TK 7-X und TK 7-X-V überwiegen, ergibt sich für ADECO-RS in Summe eine etwas größere Leistung. Das ergibt theoretisch eine um etwa 5 % kürzere Bauzeit. Praktisch ist die Bauzeit bei der NÖT allerdings kürzer, weil die Strosse weitgehend parallel zur Kalotte aufgeföhren werden kann und dadurch nicht – wie aus Gründen der Vergleichbarkeit angenommen – auf dem kritischen Weg liegt.

Kosten

Die Summe der Leistungen, die in dem Vergleich einbezogen wurden, betragen für die NÖT-Variante rund 103 Mill. EUR; für die Methode ADECO-RS 192 Mill. EUR. Die Mehrkosten für eine Ausführung nach ADECO-RS würden also rund 87 % betragen. Die Mehrkosten bei ADECO-RS sind auf folgende Faktoren zurück zu führen:

- ⇨ Größerer Ausbruchquerschnitt,
- ⇨ Mehr und teurere Stützmittel (Brustanker, Stahlbögen, Spritzbetonstärke),
- ⇨ Höhere Gerätekosten (Lafettenbohrgerät für Brustanker, längere Vorhaltezeit – alle Geräte müssen über die gesamte Vortriebszeit vorgehalten werden),
- ⇨ Mannschaft zwar kleiner, aber durchgehend in voller Stärke über die gesamte Vortriebszeit erforderlich.

Erklärung

Die Methode ADECO-RS erfordert wegen des durchgehenden Sohlgewölbes und der dicken Innenschale generell einen größeren Ausbruchquerschnitt. Außerdem benötigt sie wegen des steifen Ausbaus wesentlich mehr Stützmittel und eine stärkere Innenschale. Kosten treibend wirkt bei ADECO-RS auch die aufwändige Ortsbruststützung.

Dazu kommt eine gewisse Starrheit der Methode, insbesondere eine geringe Flexibilität bei der Dimensionierung des Ausbaus und der Innenschale. Die bei der NÖT zur Verfügung stehenden und auch eingesetzten vielfältigen Mess- und Steuerungsmechanismen werden bei ADECO-RS durch eine einzige Messung – die Extrusion der Ortsbrust – ersetzt. Diese bietet allerdings die Möglichkeit, das vor der Ortsbrust liegende Gebirge und dessen Eigenschaften frühzeitig zu erkennen und den Vortrieb darauf abzustimmen. Bei der NÖT muss die Prognose für die vorausliegende Strecke aus den gemessenen Verformungen des ausgebrochenen Hohlraums mittels Einflusslinien extrapoliert werden.

Die bei ADECO-RS angestrebte Trennung von Planung und Ausführung dürfte wohl bis auf weiteres eine Illusion bleiben, weil eine totale Durchplanung zumindest für tief liegende Hohlraumbauwerke vor Baubeginn auch in Zukunft nicht möglich sein wird. Eine geringfügig höhere Industrialisierung der Arbeiten ist mit der Methode ADECO-RS zwar erreichbar, sie wird aber teuer erkauft.

Die aufwändige Ortsbruststützung bringt im Endeffekt für die langfristige Stabilität von tief liegenden Tunneln keinen Nutzen. Die endgültige Belastung des Ausbaus kann durch eine solche Maßnahme nicht reduziert werden. Für tief liegende Tunnel ist ein Ausbau nach ADECO-RS

BÜRO FÜR GEOLOGIE UND HYDROGEOLOGIE

ZIVILINGENIEURBÜRO FÜR GEOLOGIE



5164 SEEHAM WIESENBERGSTR. 10 ÖSTERREICH

Tel. 0043/(0)6217/5959 Fax 0043/(0)6217/5959-19

www.bfgh.at - office@bfgh.at

4020 LINZ WEINGARTSHOFSTR. 37-39/6 ÖSTERREICH

Tel. 0043/(0)732/609022 Fax 0043/(0)732/609023

BAU- UND HYDROGEOLOGISCHE BERATUNG

Z. B. BEI INFRASTRUKTURBAUTEN IN ÖSTERREICH

A 7 EINHAUSUNG BINDERMICHL LINZ

A 8 WELSER WESTSPANGE

A 9 TUNNELKETTE PYHRN AUTOBAHN OBERÖSTERREICH

A 10 UMWELTMASSNAHMEN TAUERN AUTOBAHN

S 6 GANZSTEINTUNNEL

S 7 FÜRSTENFELDER SCHNELLSTRASSE

S 35 BRUCKER SCHNELLSTRASSE

B 1 UMFABRUNG HENNDORF

AUSBAU WESTBAHN SCHWANENSTADT - SALZBURG

NVT QUERUNG BAHNHOF LINZ

AUSBAU DER LINIE ZUM HARTER PLATEAU LINZ

also nicht vorteilhaft. Ein Ausbau, der zum Ziel hat, die Verformungen substanziell zu reduzieren, ist aus wirtschaftlicher Sicht kontraproduktiv. Die Behinderung der Verformungen und damit des Spannungsabbaus am Hohlraumrand sowie die in Folge des frühzeitigen Einbaus des Innengewölbes verkürzte Stützweite in Längsrichtung bewirken eine höhere Beanspruchung des Ausbaus. Dieser muss entsprechend stärker dimensioniert werden.

Ein Indiz für die Inflexibilität der Methode ADECO-RS ist die Behandlung der Sohle. Außer in Kategorie A ist nämlich überall ein Sohlgewölbe vorgesehen. Die NÖT hingegen berücksichtigt, dass die Gebirgsverformungen in der Regel nicht gleichmäßig über das Ausbruchprofil verteilt sind. Beim Strenger Tunnel wurde deshalb nicht nur die Sicherung der Firste und der Ulmen den aufgetretenen Verformungen angepasst, sondern auch die Sohlausbildung. Wie sich aus Berechnungen und Messungen ergab, war es auch in druckhaftem Gebirge nicht überall erforderlich, ein Sohlgewölbe einzubauen. Oft konnte mit einer armierten Sohlplatte, welche die horizontalen Kräfte aufnahm, das Auslangen gefunden werden.

Folgerung

Der bauwirtschaftliche Vergleich der beiden Methoden zeigt, dass ADECO-RS beim Bau von tiefliegenden Tunneln mit druckhaften Gebirgsverhalten zu wesentlich höheren Baukosten führt als die NÖT. Eine theoretisch mögliche Verkürzung der Bauzeit mit ADECO-RS kann durch die bei der NÖT mögliche und übliche parallele Ausführung der Hauptarbeiten mehr als kompensiert werden.

Quellennachweis

1. Marcher, Th. ; Starjakob, F. ; Lutz, H. ; Sotek, M.: *Comparison of Excavation Methods – ADECO-RS versus NATM*. Felsbau 22 (2004), Nr. 4, S. 38-46.

2. Verschiedene Beiträge: *Excavations Methods*. Felsbau 22 (2004), Nr. 4.
3. Schubert, W. (Hrsg.): *Rock Engineering – Theory and Practice*. Proceedings of the ISRM Regional Symposium Eurock 2004 and 53rd Geomechanics Colloquy. Essen: Verlag Glückauf GmbH, 2004.
4. Burgstaller, H.: *Bauwirtschaftlicher Vergleich: Active – Passive Approach im konventionellen Verkehrstunnelbau am Beispiel Tunnel Strengen*. Diplomarbeit am Institut für Baubetrieb, Bauwirtschaft und Baumanagement der Universität Innsbruck, 2004.
5. Schneider, E.: *Kostenmanagement im Infrastrukturbau – Kostenermittlung für Tunnelbauten*. Unveröffentlicht, 2004.
6. Verschiedene Beiträge: *Strenger Tunnel*. Felsbau 22 (2004), Nr. 1.
7. ILF: *Planungsunterlagen Strenger Tunnel*.
8. Lunardi, P.: *The design and construction of tunnels using the approach based on the analysis of controlled deformation in rocks and soils*. T&T International, May 2000, S. 3-30.
9. Hoek, E.: *Hoek-Brown failure Criterion*. 2002.
10. Carranz, C. ; Torres ; Fairhurst, C.: *Application of the Convergence – Confinement Method of Tunnel Design to Rock Masses that satisfy the Hoek-Brown Failure Criterion*. Tunneling and Underground Space Technology 15 (2000), Nr. 2, S. 187-213.
11. Zettler, A.H. ; Poisel, R.: *Anker zur Stabilisierung der Ortsbrust*. Beiträge zum 16. Christian Veder Kolloquium, 239-244. Hefte 10, 2001.
12. Cosciotti, L.: *Modellazione del comportamento del fronte in galleria ed effetto di sistemi di rinforzo*. Tesi di laurea, Cattedra di meccanica delle rocce, Università degli studi di Roma, 1998-1999.
13. Rokahr, R.B. ; Lux, K.H.: *Zur Vorbemessung tiefliegender Tunnel im Fels*. Universität Hannover – Institut für Unterirdischen Bauen, 1985.
14. John, M. ; Mattle, B. ; Zoidl, Th.: *Berücksichtigung des Materialverhaltens des jungen Spritzbetons bei Standsicherheitsuntersuchungen für Verkehrstunnel*. Taschenbuch für den Tunnelbau 2003, S. 149-188. Essen: Verlag Glückauf GmbH, 2002.

Autoren

Dipl. Ing. Harald Burgstaller, Ampfererstraße 14, A-6020 Innsbruck, Österreich, E-Mail haraldb78@yahoo.de; Dipl. Ing. Bruno Mattle, GEC Consulting Engineers ZT- GmbH, Kochstraße 1, A-6020 Innsbruck, Österreich, E-Mail bruno.mattle@gec.co.at; Univ.-Professor Dipl. Ing. Eckart Schneider, Institut für Baubetrieb, Bauwirtschaft und Baumanagement, Fakultät für Bauingenieurwesen, Universität Innsbruck, Technikerstraße 13, A-6020 Innsbruck, Österreich, E-Mail eckart.schneider@uibk.ac.at

Internet-Adressen auf einen Blick



DMT

Deutsche Montan Technologie GmbH

www.dmt.de



TechnoBochum

Mitglied der Masterflex-Gruppe

Ihr kompetenter Partner für

Schläuche und Armaturen

bei Nöt- und Schildvortrieb

www.techno-bochum.de



**Österreichische
Gesellschaft
für Geomechanik**

www.oegg.at

VGE

Verlag Glückauf Essen

www.vge.de

Ist Ihr Online-Angebot auch für **3 000** Felsbau-Leser =
Entscheider interessant?
Buchen Sie unter: + 49 (0) 20 54 / 9 24-130
Kosten: ab 95 EUR*, - pro Ausgabe

* bei Belegung von 6 Ausgaben (s/w-Preis)