

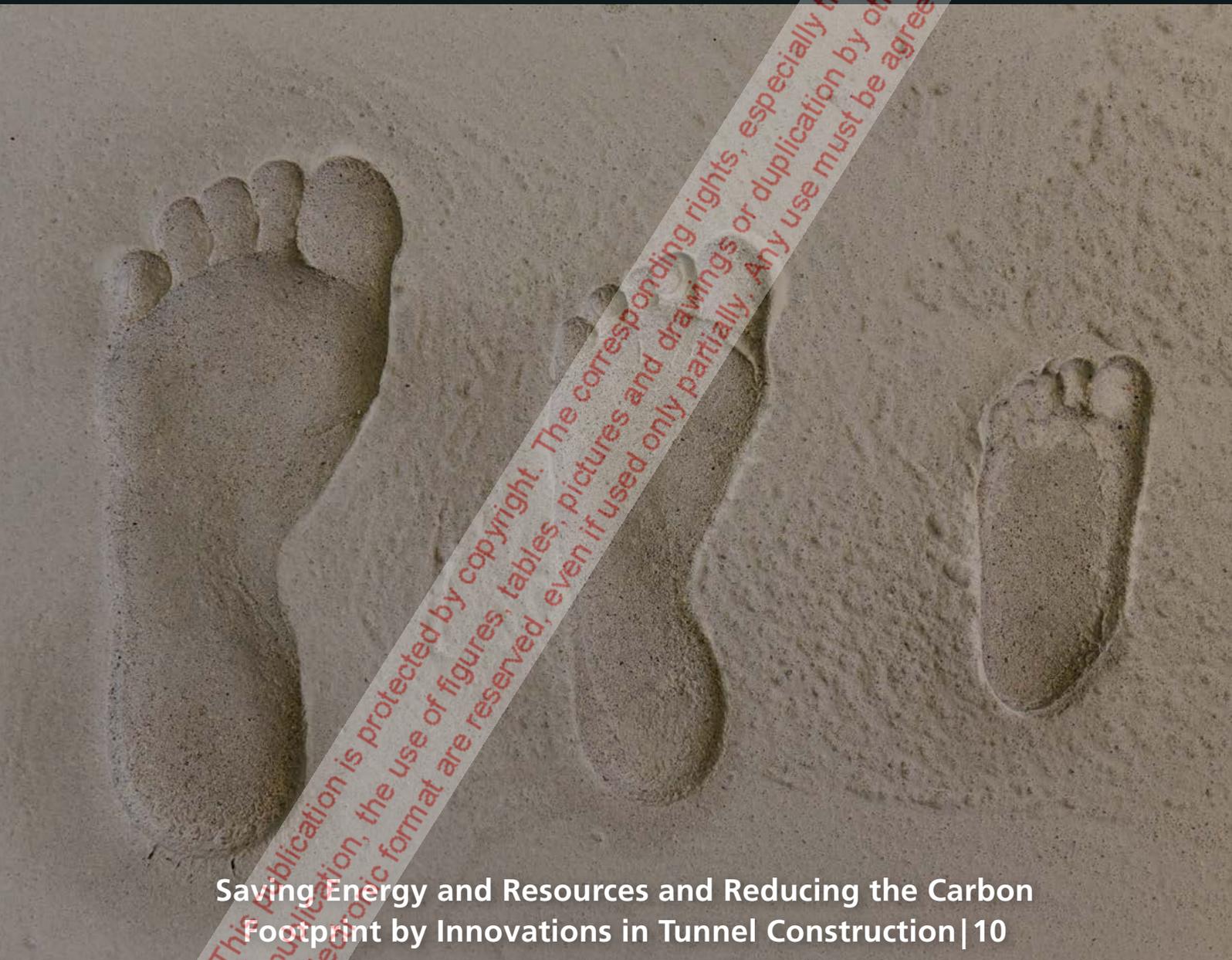


www.tunnel-online.info

tunnel

3
2022

Offizielles Organ der STUVA · Official Journal of the STUVA



Saving Energy and Resources and Reducing the Carbon Footprint by Innovations in Tunnel Construction | 10

**Contract for Renovation of Gubrist Tunnel Awarded | 6
Longitudinal Flow of Water Along Hose Assemblies
Through Inner Tunnel Linings | 28**

**Cross River Rail – Tunnelling Under
the Brisbane River and the City Centre | 40**

© Bauverlag: This publication is protected by copyright. The corresponding rights, especially that of printing, translation, presentation and publication, the use of figures, tables, pictures and drawings or duplication by other means as well as saving the document in electronic format are reserved, even if used only partially. Any use must be agreed upon with Bauverlag.

Saving Energy and Resources and Reducing the Carbon Footprint by Innovations in Tunnel Construction

Einsparung von Energie und Rohstoffen und Verringerung des CO₂-Fußabdrucks durch Innovationen im Tunnelbau

Climate protection and the geopolitical situation pose major challenges for our society. To protect the climate, we must reduce CO₂ emissions and cut the consumption of fossil energies. The war in Ukraine makes us very aware of our economy's dependence on fossil energies and their availability and costs. This makes savings even more urgent than they already have been before. Likewise, the relevance of supply chains and availability of raw materials is becoming more and more obvious – also for the construction industry. An optimization of the design of conventional tunnels by owners and planners can lead to a significant reduction in CO₂ emissions, energy and raw material requirements, and thus also in cost. In the article, potential optimizations are shown and explained with the help of examples.

Prof. Dr.-Ing. WALTER WITKE, Dr.-Ing. BETTINA WITKE-SCHMITT, Dr.-Ing. MARTIN WITKE, Dr.-Ing. PATRICIA WITKE-GATTERMANN, Dipl.-Ing. RALF DRUFFEL, WBI GmbH, Weinheim, Germany/Deutschland

1 Introduction

Climate protection and the geopolitical situation pose major challenges for our society. To protect the climate, we must reduce CO₂ emissions and cut the consumption of fossil energies. The war in Ukraine makes us very aware of our economy's dependence on fossil energies and their availability and costs. Savings become even more urgent than they already have been before. Likewise, the relevance of supply chains and availability of raw materials is becoming more and more obvious – also for the construction industry.

Recent studies show that transport infrastructure construction also contributes significantly to CO₂ emissions as well as to the consumption of energy and raw materials. In this respect, we are all called upon to contribute to improvements in every possible way. This is done in many ways, as e.g. shown in [3] and [5]. As stated very appropriately in [4], an overall view including all relevant aspects is required. This should also be objective and based on facts and not on false figures or be ideologically motivated, as is unfortunately sometimes the case. Therefore, we as civil engineers must actively participate in these discussions and make our contribution. In [1], on the basis of [2], CO₂ emissions totaling

Der Klimaschutz und die geopolitische Situation stellen unsere Gesellschaft vor große Herausforderungen. Zum Schutz des Klimas müssen wir den CO₂-Ausstoß verringern und den Verbrauch fossiler Energien senken. Der Krieg in der Ukraine führt uns die Abhängigkeit unserer Wirtschaft von fossilen Energien und deren Verfügbarkeit und Kosten sehr deutlich vor Augen und macht Einsparungen noch dringlicher als sie bisher schon waren. Ebenso wird die Bedeutung der Lieferketten sowie der Verfügbarkeit von Rohstoffen auch für die Bauwirtschaft immer deutlicher. Auch durch eine Optimierung der Planung seitens der Bauherrn und der Planer können erhebliche Reduzierungen der CO₂-Emissionen, des Energie- und Rohstoffbedarfs und damit auch der Kosten für konventionellen Tunnelbau erzielt werden. Im Beitrag werden Möglichkeiten aufgezeigt und anhand von Beispielen erläutert.

1 Einleitung

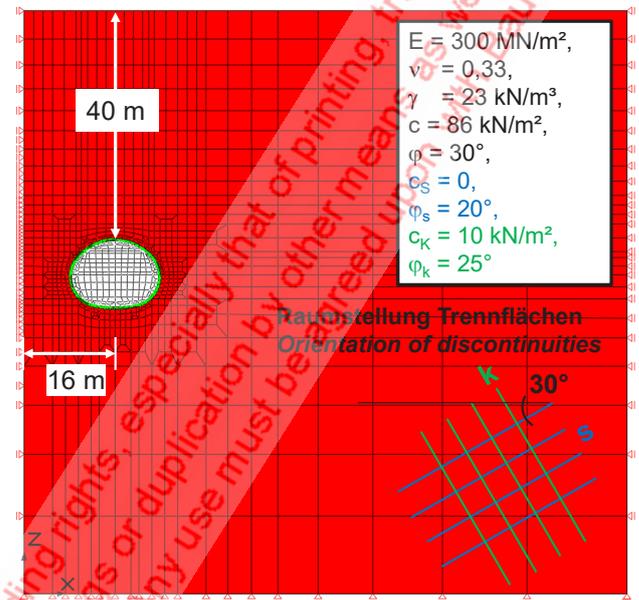
Der Klimaschutz und die geopolitische Situation stellen unsere Gesellschaft vor große Herausforderungen. Zum Schutz des Klimas müssen wir den CO₂-Ausstoß verringern und den Verbrauch fossiler Energien senken. Der Krieg in der Ukraine führt uns die Abhängigkeit unserer Wirtschaft von fossilen Energien und deren Verfügbarkeit und Kosten sehr deutlich vor Augen und macht Einsparungen noch dringlicher als sie bisher schon waren. Ebenso wird die Bedeutung der Lieferketten sowie der Verfügbarkeit von Rohstoffen auch für die Bauwirtschaft immer deutlicher.

Untersuchungen der jüngeren Vergangenheit zeigen, dass auch der Verkehrsinfrastrukturbau erheblich zum CO₂-Ausstoß sowie zum Energie- und Rohstoff-Verbrauch beiträgt. Insofern sind wir alle gefordert, in jeder möglichen Art zu Verbesserungen beizutragen. Dies wird auf vielfältige Art getan, wie z. B. [3] und [5] zeigen. Wie in [4] sehr treffend festgestellt wird, ist dabei eine Gesamtbetrachtung unter Einbeziehung aller relevanten Aspekte erforderlich. Auch sollte diese sachlich und faktenbasiert sein und nicht auf falschen Zahlen basieren oder ideologisch motiviert sein, wie es leider zum Teil der Fall ist. Deshalb sind wir als Bauingenieure gefordert, uns aktiv an diesen Diskussionen zu beteiligen und unseren Beitrag zu leisten.

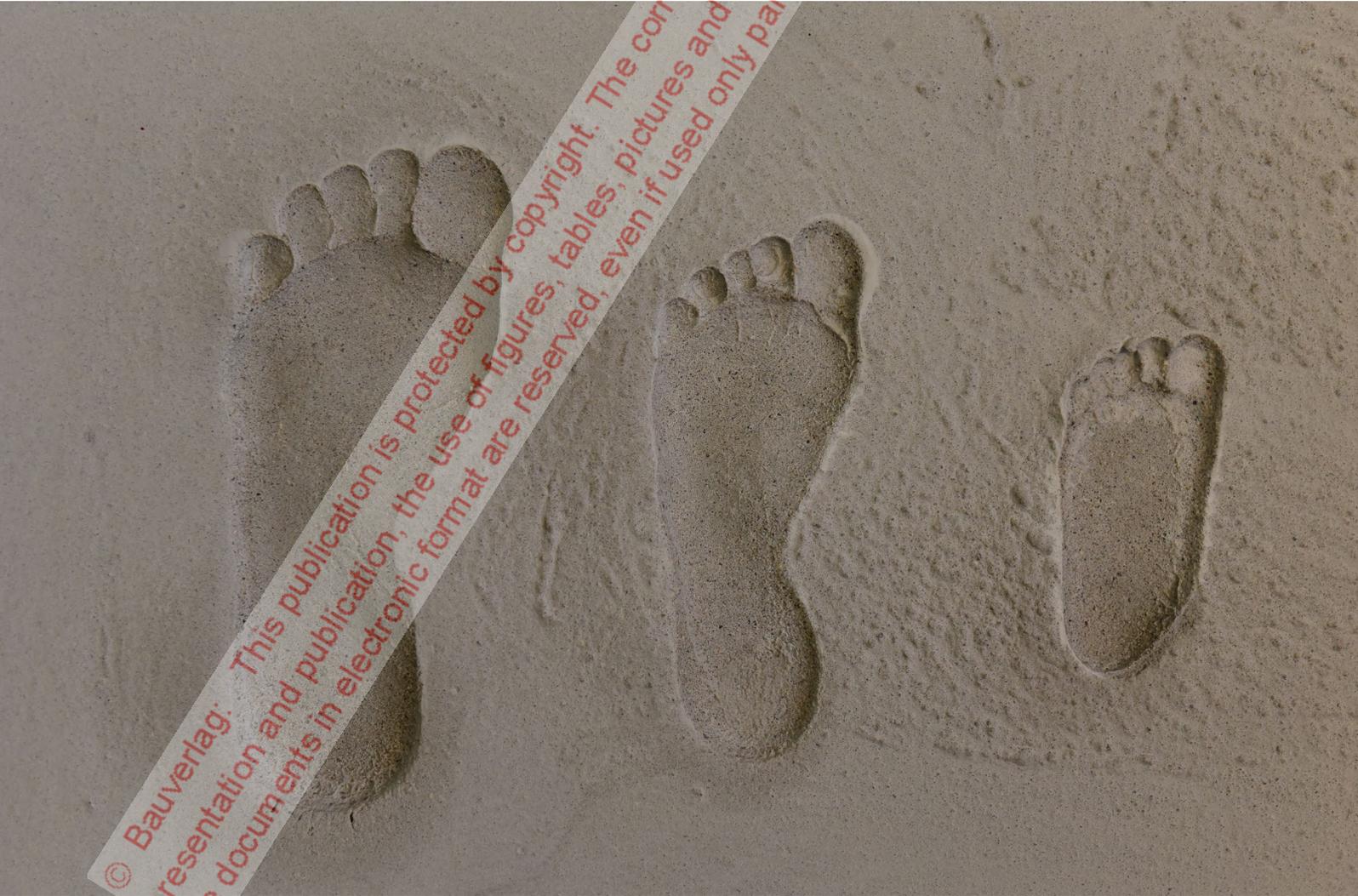
- 1** Study of motorway tunnel in rock mass, finite element mesh, boundary conditions and parameters
- Studie Autobahntunnel im Fels, FE-Netz, Randbedingungen und Kennwerte

By optimising the planning, considerable reductions regarding the carbon footprint, energy and raw material requirements can be achieved for conventional tunnelling

Durch eine Optimierung der Planung können für den konventionellen Tunnelbau erhebliche Reduzierungen des CO₂-Fußabdrucks sowie des Energie- und Rohstoffbedarfs erzielt werden



Credit/Quelle: WBI



Credit/Quelle: WBI

2127,62 kilotons were determined for the construction phase of the Brenner Base Tunnel. More than 80% of these emissions resulted from the demand for cement and steel. Also for two railroad tunnels excavated with a TBM and for two highway tunnels built with the conventional tunneling method, it is shown in [1] that more than 80% of the CO₂ emissions in the construction phase are attributable to the construction materials cement and steel. Furthermore, the production of these two construction materials is energy intensive. At the same time, steel is one of the building materials with increasing bottlenecks regarding supply chains and considerable price increases. Against this background, reducing the need for cement and steel can make a significant contribution to reducing CO₂ emissions as well as energy and raw material requirements in infrastructure construction. This comes along with a significant reduction in construction costs, which is in line with the economic efficiency imperative to be followed by public authorities who are in charge of transport infrastructure.

In this article, possibilities for optimizing the design of conventional tunnels are presented that can contribute to a considerable reduction in the demand for the above-mentioned construction materials. The article does not draw up an all-encompassing carbon footprint in connection with the construction of traffic tunnels, but rather focuses on these very building materials and their savings through optimised planning. Similarly, we do not claim to be exhaustive in our discussion of optimizations. Rather, our aim is to point out possible optimizations and the corresponding contribution on the part of owners and tunnel planners.

2 Design and Stability Verification

In tunnel construction, the subsoil is an essential load-bearing element. Therefore, it is crucial for an economical and safe design to realistically model the subsoil and the support or lining as well as their mutual interaction.

The authors have presented a rock mechanical and rock hydraulic model for fractured rock masses [6–9], which they have been using successfully for many years in conjunction with WBI's own three-dimensional finite element programs FEST 03 and HYD 03 for the design of tunnel structures in rock masses as well as in soil. In almost all executed projects, displacement and stress measurements were carried out and compared with the predictions. In this way, the authors have acquired a high degree of forecasting reliability, which can be used for future optimization of tunnel designs with regard to reducing CO₂ emissions, energy consumption and raw material requirements, and thus also costs. This is explained below using selected examples. In this context, we would also like to

In [1] wurden auf Basis von [2] für die Bauphase des Brenner Basistunnels CO₂-Emissionen von insgesamt 2127,62 Kilotonnen ermittelt. Mehr als 80 % dieser Emissionen resultierten aus dem Bedarf an Zement und Stahl. Auch für zwei mit einer TVM aufgefahrene Eisenbahntunnel sowie zwei nach der Spritzbetonbauweise hergestellte Autobahntunnel wird in [1] gezeigt, dass mehr als 80 % der CO₂-Emissionen in der Bauphase auf die Baustoffe Zement und Stahl zurückzuführen sind. Darüber hinaus ist die Produktion dieser beiden Baustoffe energieintensiv. Gleichzeitig ist Stahl einer der Baustoffe, bei dem es im Hinblick auf Lieferketten und Rohstoffversorgung vermehrt zu Engpässen und Teuerungen kommt.

Vor diesem Hintergrund kann mit der Verringerung des Bedarfs an Zement und Stahl ein erheblicher Beitrag zur Verringerung der CO₂-Emissionen, des Energie- und des Rohstoffbedarfs im Infrastrukturbau geleistet werden. Damit einher geht auch eine deutliche Reduzierung der Baukosten, was im Sinne des Wirtschaftlichkeitsgebots ist, dem die öffentliche Hand als Bauträger der Verkehrsinfrastruktur unterliegt.

Im vorliegenden Artikel werden Möglichkeiten zur Optimierung des Entwurfs von konventionell aufzufahrenden Tunnelbauwerken aufgezeigt, die zu einer erheblichen Reduzierung des Bedarfs der genannten Baustoffe beitragen können. Es wird keine allumfassende Bilanzierung der CO₂-Emissionen im Zusammenhang mit dem Verkehrstunnelbau aufgestellt, sondern der Fokus auf eben diese Baustoffe und deren Einsparung durch eine optimierte Planung gelegt. Ebenso wenig wird der Anspruch gestellt, die möglichen Optimierungen erschöpfend zu behandeln. Vielmehr geht es uns darum, mögliche Optimierungen und damit einen möglichen Beitrag seitens der Bauherren und Tunnelplaner aufzuzeigen.

2 Entwurf und Standsicherheitsnachweis

Im Tunnelbau stellt der Baugrund ein wesentliches tragendes Element dar. Deshalb ist es für einen wirtschaftlichen und sicheren Entwurf entscheidend, sowohl den Baugrund als auch die Sicherung bzw. Auskleidung sowie deren Zusammenwirken wirklichkeitsnah zu erfassen.

Die Autoren haben für klüftigen Fels ein felsmechanisches und felshydraulisches Modell vorgestellt [6–9], dass sie in Verbindung mit den WBI-eigenen dreidimensionalen FE-Programmen FEST 03 und HYD 03 seit vielen Jahren für die Planung von Tunnelbauwerken im Fels sowie im Lockergestein erfolgreich anwenden. Bei nahezu allen ausgeführten Projekten wurden Verschiebungs- und auch Spannungsmessungen durchgeführt und mit den Prognosen verglichen. Auf diese Weise haben sich die Autoren eine hohe Prognosesicherheit erarbeitet, die für zukünftige Optimierungen von Tunnelentwürfen im Hinblick auf die Verringerung des CO₂-Ausstoßes, des Energieverbrauchs und Rohstoffbedarfs und damit auch der Kosten nutzbar gemacht werden kann.

point out that corresponding calculations based on the authors' model can in principle also be carried out with the Sofistik program, so that the procedure is also open to other planning offices.

3 Basic Considerations for Optimizing the Tunnel Cross-Section and Excavation Sequence in Conventional Tunnel Construction

In the first instance, the choice of tunnel cross-section is determined by the requirements resulting from the later use of the structure. For example, there are different requirements for the cross-section design for single or multi-lane road tunnels, for single and multi-track railroad tunnels and for underground stations. Furthermore, the ground and groundwater conditions result in certain requirements for the shape of the cross-section.

Considerations of the stability of the temporary working face and construction-related aspects finally lead to certain sequences of excavation in partial cross-sections. This also means that areas temporarily supported with reinforced shotcrete and anchors have to be excavated again and the corresponding support materials disposed of. Obviously, this is unfavorable regarding carbon footprint, energy and raw material requirements and costs. This is the case, for example, with sidewall headings and advancing vault excavation with temporary invert. Here, moreover, heavy reinforcement often results at the transitions from the partial cross sections to the final cross section.

Irrespective of the excavation sequence, the design of the tunnel cross-section has a considerable influence on the material requirements. Flat surfaces and corners or insufficient curvatures of the temporary support lead to bending moments and shear forces and thus require large shotcrete thicknesses and heavy reinforcement. Unfortunately, numerous examples of this can be found in construction practice both nationally and internationally. In contrast, a well-rounded shotcrete membrane is mainly stressed by normal forces and does not require static reinforcement (membrane theory). Achieving this should be the goal of a good tunnel design.

Consequently, the design of cross-sections and the choice of construction sequences can have a considerable influence on the consumption of cement and steel, which has a direct impact on carbon footprint, energy and raw material requirements, and thus costs.

The influence of the construction process will subsequently be explained in more detail by means of a systematic consideration of the cross-section of a two-lane highway tunnel. The rock cover is assumed to 40 m. The rock mass model and parameters are selected on the basis of a project example presented in [6], chapter 3.2 (Fig. 1).

Dies wird nachstehend anhand ausgewählter Beispiele erläutert. In diesem Zusammenhang möchten wir darauf hinweisen, dass entsprechende Berechnungen, die auf dem Modell der Autoren basieren, grundsätzlich auch mit dem Programm Sofistik durchgeführt werden können, so dass die Vorgehensweise anderen Planungsbüros ebenfalls offensteht.

3 Grundsätzliche Überlegungen zur Optimierung des Tunnelquerschnitts und der Ausbruchfolge im konventionellen Tunnelbau

Die Wahl des Tunnelquerschnitts ergibt sich zunächst aus den Anforderungen, die aus der späteren Nutzung des Bauwerks resultieren. So ergeben sich beispielsweise für ein- oder mehrspurige Straßentunnel, für ein- und mehrgleisige Eisenbahntunnel und für untertägige Stationen unterschiedliche Anforderungen an die Querschnittsgestaltung. Des Weiteren resultieren aus den Baugrund- und Grundwasserhältnissen bestimmte Anforderungen an die Querschnittsformen.

Betrachtungen zur Standsicherheit der temporären Ortsbrust und baubetriebliche Belange führen schließlich zu bestimmten Reihenfolgen beim Auffahren des Hohlraums in Teilquerschnitten. Dabei kommt es auch dazu, dass mit bewehrtem Spritzbeton und Ankern gesicherte Bereiche wieder ausgebrochen und die dabei anfallenden Sicherungsmittel entsorgt werden müssen – was aus Sicht der CO₂-Bilanz, des Energie- und Rohstoffbedarfs und der Kosten natürlich ungünstig ist. Das ist beispielsweise bei Ulmenstollenvortrieben und Kalottenvortrieben mit temporärer Sicherung der Kalottensohle der Fall. Hier ergeben sich an den Übergängen von den Teilquerschnitten zum endgültigen Querschnitt zudem häufig starke Bewehrungen.

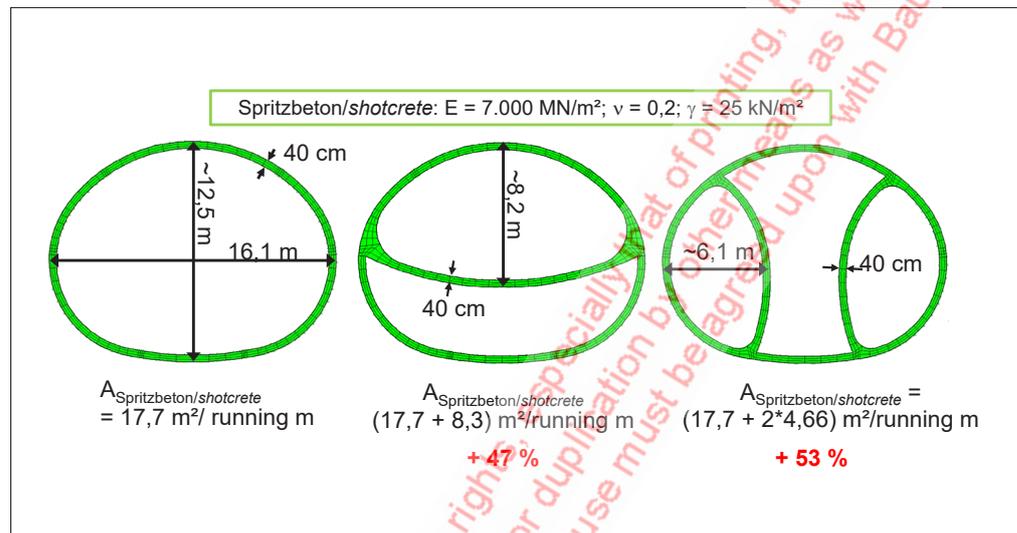
Unabhängig von der Auffahrreihenfolge hat die Gestaltung des Tunnelquerschnitts erheblichen Einfluss auf den Materialbedarf. Ebene Flächen und Ecken bzw. schlechte Ausrundungen führen zu Biegemomenten und Querkräften und erfordern große Spritzbetondicken und große Bewehrungsanteile. In der Baupraxis finden sich national wie international leider zahlreiche Beispiele hierfür. Dahingegen ist eine gut ausgerundete Spritzbetonschale überwiegend durch Normalkräfte beansprucht und erfordert keine statische Bewehrung (Membrantheorie). Dies zu erreichen, sollte das Ziel eines guten Tunnelentwurfs sein.

Folglich kann durch die Querschnittsgestaltung sowie durch die Wahl des Bauablaufs erheblicher Einfluss auf den Verbrauch an Zement und Stahl genommen werden, was sich unmittelbar auf die CO₂-Emissionen, den Energie- und Rohstoffbedarf sowie die Kosten auswirkt.

Der Einfluss des Bauablaufes soll hier beispielhaft mittels einer systematischen Betrachtung des Querschnitts eines zweispurigen Autobahntunnels näher erläutert werden. Die Felsüberdeckung wird zu 40 m angenommen. Baugrundmodell und Kennwerte werden in Anlehnung an ein Projektbeispiel gewählt, das in [6], Kapitel 3.2 vorgestellt wurde (Bild 1). Abweichend von dem dort vorgestellten Projekt sind die

2 Detail of finite element mesh with investigated tunnel cross-sections and construction sequences

Detail des FE-Netzes mit untersuchten Tunnelquerschnitten und Ausbruchfolgen



Credit/Quelle: WBI

Deviating from the project presented there, the bedding parallel discontinuity planes are inclined at less than 30° in the given case. The stability calculations are performed with the finite element program FEST 03 on a vertical slice section. The 40 cm thick shotcrete membrane is discretized in the FE mesh by three rows of isoparametric elements (Fig. 2). For comparison, a full face excavation, a sidewall heading and a vault excavation with temporary vault invert were investigated.

For the vault heading, comparatively large bending moments, shear and normal forces result in the area of the transition to the temporary invert, leading to accordingly large reinforcement against compression and shear (Fig. 3). The stresses in the shotcrete membrane are more favorable for the sidewall heading in the example considered here. However, shear reinforcement is also required in this case (Fig. 4).

The most favorable loading results from full face excavation. Here, the bending moments and shear forces are small in comparison with the normal forces, so that no reinforcement is required from a structural point of view (Fig. 5). In this regard, it is also possible to dispense with steel arches and anchors. It is advisable to carry out a full excavation with shotcrete support with a certain proportion of steel fibers. Depending on the ground conditions, such a solution may entail greater expenditure for temporary face support, which would have to be taken into account in a comparison.

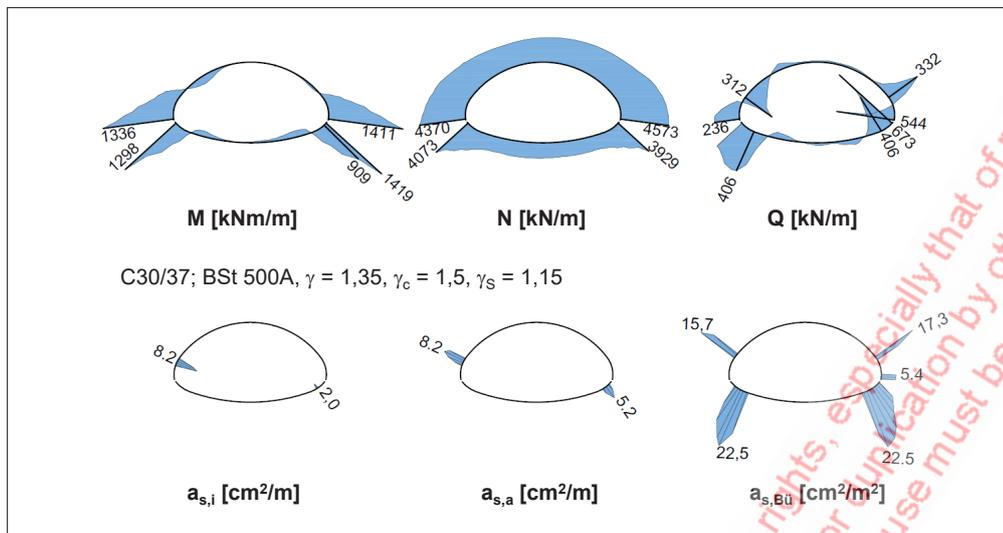
If only shotcrete is looked at in the given example, and full face excavation is taken as base value, then the additional need of shotcrete amounts to 47% for vault heading, and 53% for sidewall heading (Fig. 2). In view of a shotcrete requirement of $17,7 \text{ m}^3$ per running meter of tunnel at full face excavation, these additional quantities are considerable, and their saving leads to substantial

Schichtflächen hier unter 30° geneigt. Der Standsicherheitsnachweis wird mit dem FE-Programm FEST 03 an einer vertikalen Scheibe geführt. Die 40 cm dicke Spritzbetonschale ist im FE-Netz durch 3 Reihen isoparametrischer Elemente diskretisiert (Bild 2). Zum Vergleich wurden ein Vollausbuch, ein Ulmenstollenvortrieb und ein Kalottenvortrieb mit temporärer Sohle untersucht.

Für den Kalottenvortrieb ergeben sich in dem Bereich des Übergangs zur temporären Sohle vergleichsweise große Biegemomente, Quer- und Normalkräfte, die zu einer entsprechend großen Druck- und Querkraftbewehrung führen (Bild 3). Die Beanspruchung des Spritzbetons im Bereich der Ulmenstollen ist für das hier betrachtete Beispiel günstiger. Allerdings werden auch hier Schubbewehrungen erforderlich (Bild 4).

Am günstigsten ist die Beanspruchung beim Vollausbuch. Hier sind die Biegemomente und Querkräfte im Vergleich zu den Normalkräften gering, sodass statisch keine Bewehrung erforderlich ist (Bild 5). Auch auf Streckenbögen und Anker kann man aus statischer Sicht verzichten. Es bietet sich an, einen Vollausbuch mit einer Sicherung aus Spritzbeton mit einem gewissen Anteil an Stahlfasern auszuführen. In Abhängigkeit von den Baugrundverhältnissen kann eine solche Lösung einen größeren Aufwand für die Ortsbrustsicherung nach sich ziehen, der bei einem Vergleich zu berücksichtigen wäre.

Wenn man nur den Spritzbeton betrachtet, so ergibt sich im betrachteten Beispiel im Vergleich zum Vollausbuch ein Mehrverbrauch von 47 % für den Kalottenvortrieb und 53 % für den Ulmenstollenvortrieb (Bild 2). Bei einem Spritzbetonbedarf von $17,7 \text{ m}^3/\text{lfm}$ Tunnel sind das erhebliche Mengen, deren Einsparung zu deutlichen Reduktionen an CO_2 -Emissionen, Energie- und Rohstoffbedarf und damit auch der Kosten führen. Hinzu kommen die erwähnten Einsparungen an Bewehrung, Streckenbögen und radialen Ankern, die beim Vollausbuch möglich werden und die zu einer entsprechenden Reduktion des Stahlverbrauchs führen, der hier nicht quantifiziert wird.



Credit/Quelle: WBI

3 Tunnel heading with advancing vault and temporary vault invert, internal forces and required reinforcement

Kalottenvortrieb mit temporärer Sohle, Schnittgrößen und erforderliche Bewehrung

reductions in carbon footprint, energy and raw material requirements, and thus also in costs. Added to this are the aforementioned savings in reinforcement, steel arches and radial anchors, which become possible with full excavation. This leads to a corresponding reduction in steel consumption, which is not quantified here. For large cross sections, the full face excavation results in large working heights. Since the available construction equipment has only a limited reach, it is currently necessary to backfill the invert and bench areas with excavated material for the vault excavation and to remove this material for the next invert excavation and closure. The energy required for this, is small compared with the savings achieved by shotcrete reduction. Nevertheless, in such cases it is advisable to consider working in two levels, e.g. with suspended monorails. Such considerations must already be taken into account in the invitation to tender for tunnel construction, so that the bidding companies can adequately prepare their construction operations. This is where owners and planners are called upon.

4 Comparison of Sidewall Heading and Full Face Excavation Based on a Project Example

In this chapter, the tunnel headings in two sections of the Stuttgart 21 project are compared with each other. These are the connecting sections on both sides of the new through station. For the connection of the new through station to the lines leading to Bad Cannstatt and Feuerbach, two dual-track tunnel tubes were driven underneath the mountain Kriegsberg [11]. For the transition of the four tracks from the single-track tunnel tubes from the direction of Feuerbach and Bad Cannstatt into the new eight-track through station, cross-overs and transfer connections are

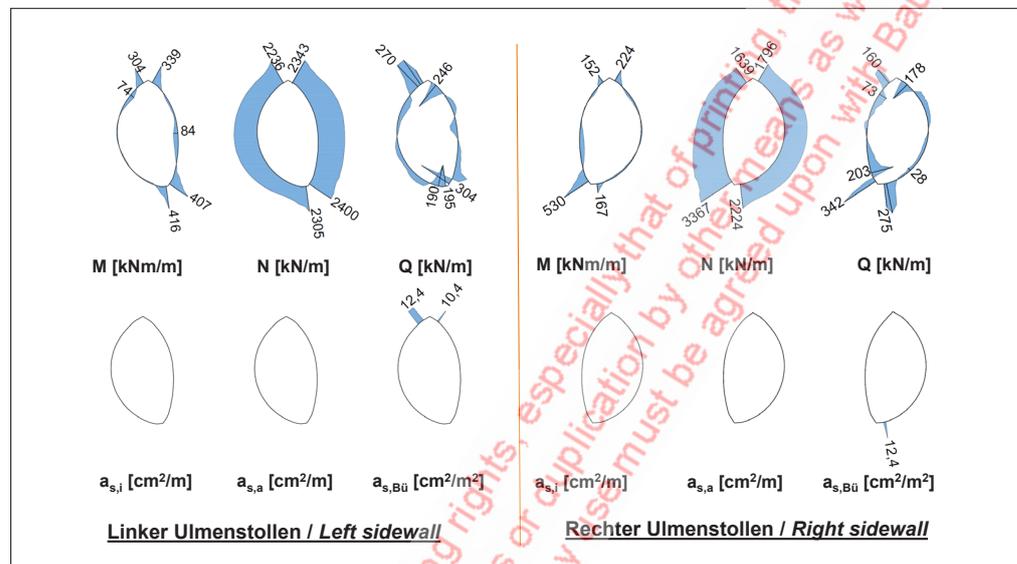
Bei großen Querschnitten entstehen durch den Vollausbuch große Arbeitshöhen. Da die verfügbaren Baugeräte nur eine begrenzte Reichweite haben, ist es notwendig, für die Kalotten-Abschläge die Sohl- und Strossenbereiche mit Ausbruchmaterial anzuschütten und das Material für den nächsten Sohlaushub und Sohlschluss wieder wegzuräumen. Der dazu erforderliche Energieaufwand ist im Vergleich zu den beim Spritzbeton erzielten Einsparungen gering. Dennoch empfiehlt es sich, in solchen Fällen über einen Vortrieb in zwei Ebenen, z. B. mit Einschienen-Hängebahnen nachzudenken. Derlei Überlegungen müssen bereits in die Ausschreibung der Tunnelbaumaßnahme einfließen, damit die anbietenden Firmen sich baubetrieblich darauf einstellen können. Hier sind also Bauherren und Planer gefragt.

4 Vergleich Ulmenstollenvortrieb und Vollausbuch anhand eines Projektbeispiels

Nachfolgend werden die Vortriebe in zwei Abschnitten des Projekts Stuttgart 21 miteinander verglichen. Es handelt sich um die Anbindungsstrecken auf den beiden Seiten des neuen Durchgangsbahnhofs. Für die Anbindungen des neuen Durchgangsbahnhofs in Richtung Bad Cannstatt und in Richtung Feuerbach wurden zwei zweigleisige Tunnelröhren unter dem Kriegsberg aufgeföhren [11]. Zur Einführung der vier Gleise aus den eingeleisigen Tunnelröhren aus Richtung Feuerbach und Bad Cannstatt in den neuen achtgleisigen Durchgangsbahnhof enthält der 210 m lange Abschnitt Ausföhdelungen und Überleitverbindungen. In der Folge wurden hier vergleichsweise große Tunnelquerschnitte mit Breiten bis ca. 22,5 m und Höhen bis ca. 16 m erforderlich. Die Überlagerung der Tunnelfirsten beträgt an der Anschlagwand ca. 9 m und nimmt mit zunehmender Entfernung von der Baugrube auf max. ca. 55 m zu. Die Tunnelröhren

4 Sidewall heading, internal forces and required reinforcement in right and left sidewall

Ulmenstollenvortrieb, Schnittgrößen und erforderliche Bewehrung rechter und linker Ulmenstollen



foreseen in the 210 m long section. As a result, comparatively large tunnel cross-sections with widths of up to approx. 22.5 m and heights of up to approx. 16 m were required here.

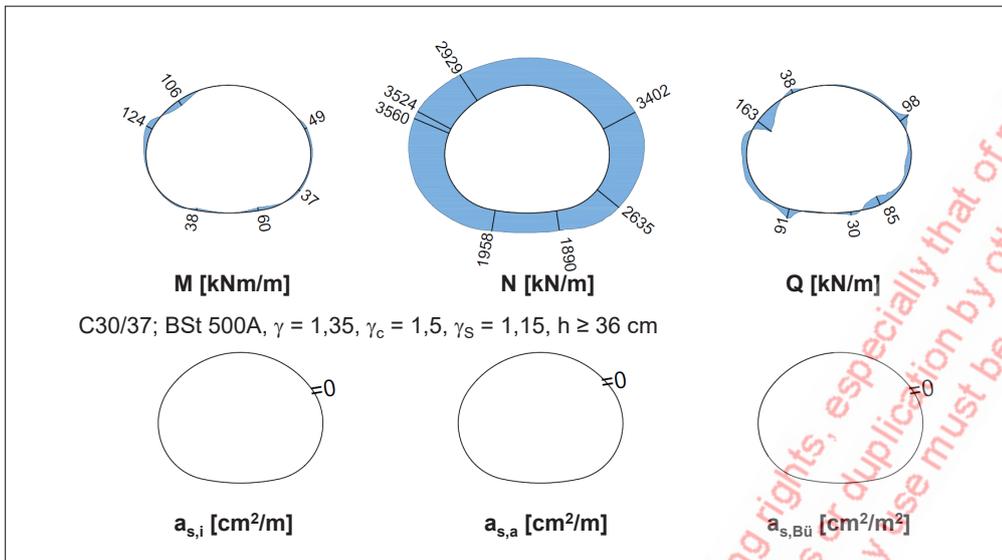
The cover above the tunnel roof amounts to approx. 9 m at the portal wall and increases to approx. 55 m with increasing distance from the excavation pit. The tunnel tubes are located in leached Gypsum Keuper. This is a residual rock mass formed by dissolution and removal ("leaching") of the sulfates of the competent source rock, the so-called unleached Gypsum Keuper, and by weathering over geological periods.

The tunnel sections with the large cross-sections were excavated conventionally with sidewall heading (Figs. 6–8). The sidewall galleries were excavated at full face with a double-stepped face. The round length ranged from 50 cm to 1 m. The invert was closed at the latest 2,5 m behind the face of the sidewall vault. Spiles were installed as roof support and face anchors were installed as face support. A systematic radial anchoring was foreseen (Fig. 6). The core was driven in two steps. In alternation, 10 m of core were excavated and supported, followed by 10 m of bench and invert. The invert was closed at the latest 10 m behind the working face. Depending on the ground conditions encountered and the results of the geotechnical measurements carried out during heading, pipe umbrellas or spile umbrellas were installed at the roof (Fig. 7). The shotcrete membrane is 40–45 cm thick in the outer contour and 35–40 cm thick in the temporary sidewalls. In addition, a temporary vault invert with a thickness of 35 cm was installed in the sidewall galleries in some areas. A 35–40 cm thick temporary invert was also constructed in the core. Two-layer mesh reinforcement was installed, in

liegen im ausgelaugten Gipskeuper. Dabei handelt es sich um ein Residualgestein, das durch Lösung und Abtransport („Auslaugung“) der Sulfate des gesteinsfesten Ausgangsgesteins (des sogenannten unausgelaugten Gipskeupers) sowie durch Verwitterung in geologischen Zeiträumen entstanden ist.

Die Tunnelabschnitte mit den großen Querschnitten wurden konventionell nach der Spritzbetonbauweise mit Ulmenstollenvortrieben aufgeföhren (Bilder 6–8). Die Vortriebe der Ulmenstollen erfolgten im Vollaussbruch mit zweifach abgetrepter Ortsbrust. Die Abschlagtiefen betragen 50 cm bis 1 m. Der Sohlschluss wurde spätestens 2,5 m hinter der Ortsbrust der Ulmenkalotte ausgeföhrt. Vorauseilend wurden über Kopf SpieÙe eingebaut sowie Ortsbrustanker zur Sicherung der Ortsbrust. Nach auÙen wurde eine Systemankerung ausgeföhrt (Bild 6). Der Kern wurde in zwei Schritten aufgeföhrt. Im Wechsel wurden 10 m Kernkalotte vorgeföhrt und nachlaufend 10 m Strosse und Sohle abgebaut. Der Sohlschluss wurde spätestens 10 m hinter der Ortsbrust ausgeföhrt. In Abhängigkeit von den angetroffenen Baugrundverhältnissen und den Ergebnissen der vortriebsbegleitend durchgeföhrt geotechnischen Messungen wurden vorauseilend über Kopf Bohrrohrschirme oder SpieÙschirme ausgeföhrt (Bild 7). Die Spritzbetonsicherung ist in der AuÙenkontur 40 bis 45 cm und in den Ulmenstielen 35 bis 40 cm dick. Zusätzlich wurde bereichsweise eine temporäre Kalottensohle in den Ulmenstollen mit einer Dicke von 35 cm eingebaut. Im Kern wurde ebenfalls eine 35 bis 40 cm dicke temporäre Sohle hergestellt. Es wurde eine zweilagige Mattenbewehrung mit zum Teil starken Bewehrungszulagen eingebaut (Bilder 6 + 7).

Auf der anderen Seite des Durchgangsbahnhofs wurden zwei zweigleisige Tunnelröhren für die Anbindung des Bahnhofs an die Strecken zur Filderebene und nach Ober- und



Credit/Quelle: WBI

5 Full face excavation, internal forces and required reinforcement

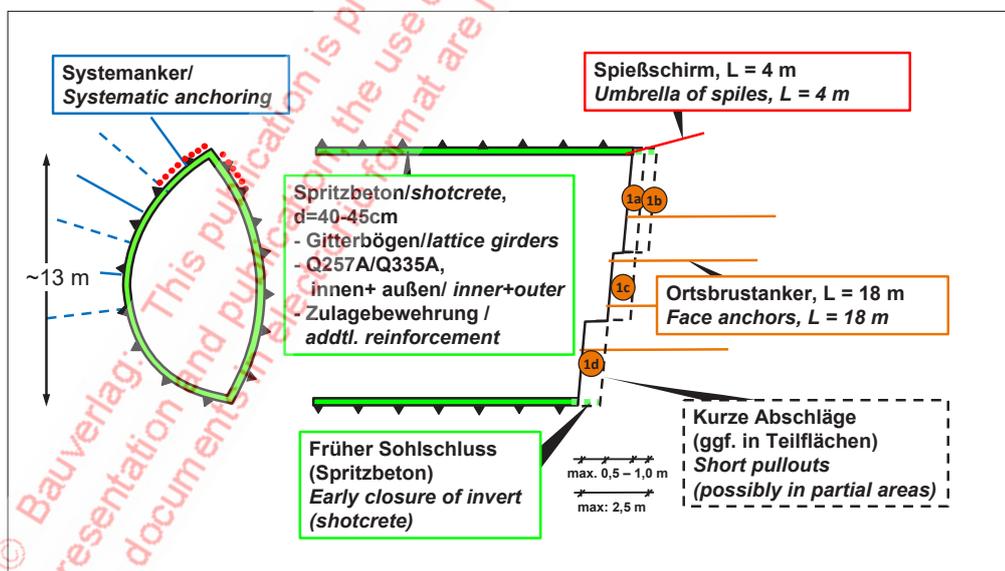
Vollausbruch, Schnittgrößen und erforderliche Bewehrung

some cases with heavy reinforcement additions (Figs. 6 + 7).

On the other side of the new through station, two dual-track tunnel tubes were excavated to connect the station to the lines leading to the Filder plane and to Ober- and Untertürkheim [10]. This so-called "central station south approach area" is approx. 224 m and 230 m long, respectively. In this widening area, the tunnels have an excavation cross-section of up to 20,0 m wide and 15,6 m high. The tunnel tubes are located under the dense urban development "Kernviertel" and have an overburden of approx. 7 m at the main station, which increases to approx. 45 m in the further course of the widening area. Both tunnel tubes are located in the layers of the leached Gypsum Keuper.

Untertürkheim aufgefahren [10]. Dieser sogenannte Anfahrbereich Hauptbahnhof Süd ist ca. 224 m bzw. 230 m lang. Die Tunnel besitzen in diesem Aufweitungsbereich einen bis zu 20,0 m breiten und 15,6 m hohen Ausbruchquerschnitt. Die Röhren liegen unter der innerstädtischen Bebauung des Kernviertels und besitzen am Hauptbahnhof eine Überdeckung von ca. 7 m, die im weiteren Verlauf des Aufweitungsbereiches auf ca. 45 m anwächst. Beide Röhren kommen in den Schichten des ausgelaugten Gipskeupers zu liegen.

Die Tunnel wurden auf nahezu der gesamten Länge im Vollausbruch mit einer abgetreppten Ortsbrust aufgefahren (Bilder 9 + 10). Die Abschlagslängen betragen 1 m in der Kalotte und 2 m in der Strosse/Sohle. Der Sohlschluss wurde nach maximal 5 m hergestellt (Bild 9). Der Vortrieb erfolgte im Schutz einer vorausseilenden Sicherung aus Bohrrohrschirmen.

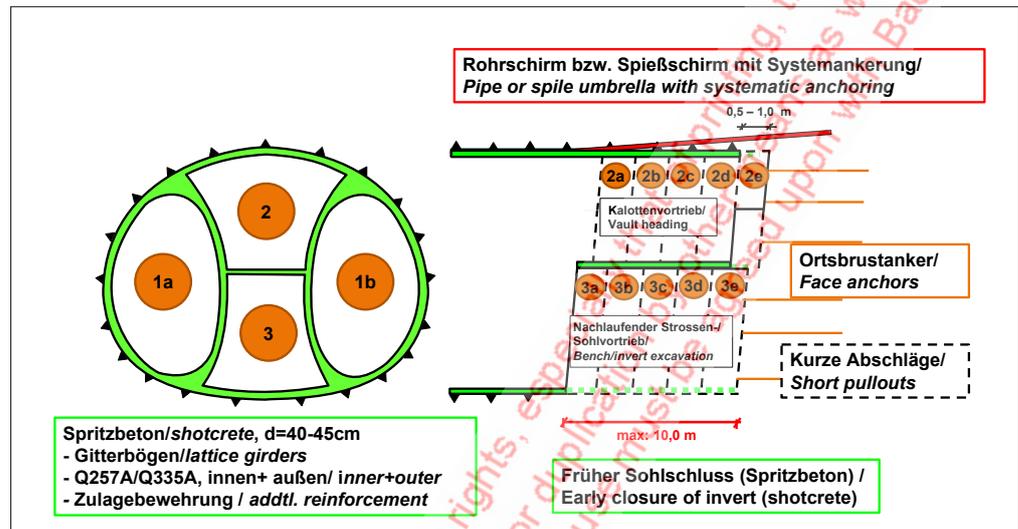


Credit/Quelle: WBI

6 Untertunneling of Kriegsberg, sidewall heading, excavation and support

Untertunneling Kriegsberg, Ulmenstollenvortrieb, Ausbruch und Sicherung

- 7 Untertunneling of Kriegsberg, excavation and support of core
Unterfahrung Kriegsberg, Kernvortrieb, Ausbruch und Sicherung



Almost the entire length of the tunnels was excavated in full face excavation with a stepped face (Figs. 9 + 10). The round lengths were 1 m in the vault and 2 m in the bench/invert. The invert was closed after a maximum of 5 m (Fig. 9). Excavation was carried out under the protection of an advance pipe umbrella. The vertical stepped face was supported with 16 m long face anchors. A systematic radial anchoring was installed in the sidewalls and an invert anchoring in the invert area (Fig. 9). The shotcrete membrane is 50 cm thick. Locally, the shotcrete thickness was increased to 60 cm in the sidewalls. In the vault, a steel fibre reinforced shotcrete was installed. In the bench/invert, the reinforcement consists of two-layers of reinforcing steel mats (Fig. 9).

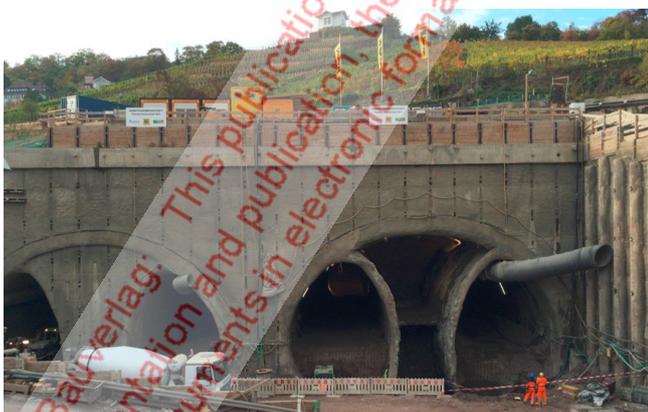
The tunnel headings underneath the "Kriegsberg" and in the "central station south approach area" are comparable with regard to the ground conditions and the excavated cross-sections and lengths. Therefore, the consumption of shotcrete, reinforcement and face anchors is compared in the following. The other support elements

Die vertikale abgetreppte Ortsbrust wurde mit 16 m langen Ortsbrustankern gesichert. In den Ulmen wurde eine Systemankerung und in der Sohle eine Sohlankerung eingebaut (Bild 9). Die Spritzbetonsicherung ist 50 cm dick. Bereichsweise wurde in den Ulmen eine Verstärkung des Spritzbetons auf 60 cm durchgeführt. In der Kalotte wurde ein stahlfaserverstärkter Spritzbeton eingebaut. In der Strosse/Sohle besteht die Bewehrung aus zweilagigen Baustahlgewebematten (Bild 9).

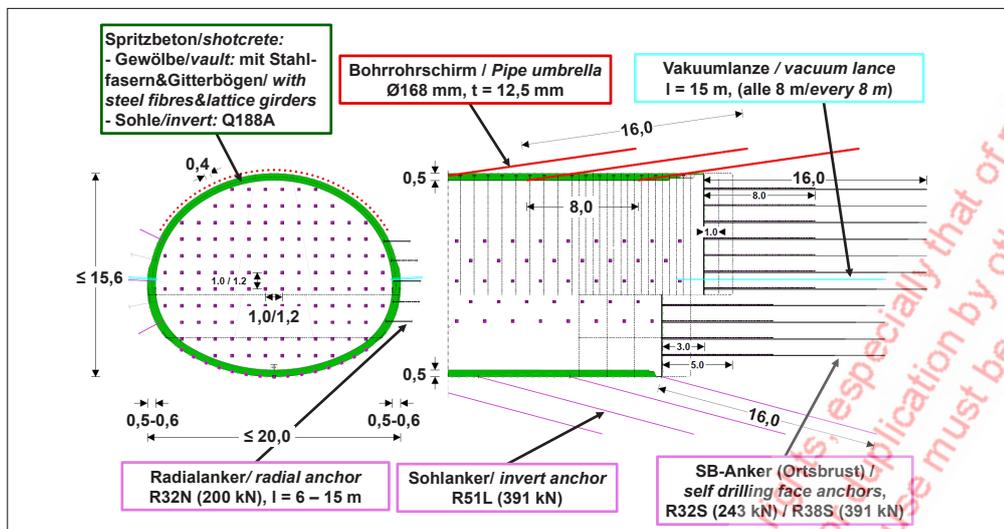
Die Vortriebe unter dem Kriegsberg und im Anfahrbereich Hbf. Süd sind hinsichtlich der Untergrundverhältnisse sowie der aufgefahrenen Querschnitte und Längen vergleichbar. Daher wird nachfolgend der Verbrauch an Spritzbeton, Bewehrung und Ortsbrustankern gegenübergestellt. Die übrigen Sicherungsmittel werden bei dem Vergleich nicht betrachtet, da das Vortriebsverfahren (Ulmenstollenvortrieb oder Vollausbuch) keinen maßgeblichen Einfluss auf die Anzahl dieser Sicherungsmittel hat.

Im Vollausbuch im Anfahrbereich Hbf. Süd wurde deutlich weniger Spritzbeton verbraucht. Durch den Entfall der Ulmenstiele und der temporären Sohlen wurden 6700 m³ weniger Spritzbeton eingebaut. Dies entspricht einer Einsparung von 40 % (Bild 11). Noch deutlicher ist die Einsparung bei der Bewehrung. Infolge der geringeren Spritzbetonsicherungen und des statisch günstigeren Querschnitts im Vollausbuch (vgl. Kapitel 3) wurden 827 t weniger Bewehrungsstahl im Anfahrbereich Hbf. Süd eingebaut. Dies entspricht einer Einsparung von 73 % (Bild 11).

Dagegen wurden im Anfahrbereich Hbf. Süd deutlich mehr Ortsbrustanker eingebaut. Dies ist einerseits durch die größere zu sichernde Ortsbrustfläche begründet. Andererseits musste beim Anfahrbereich eine besonders starke Ortsbrustsicherung eingebaut werden, um die vorausseilenden Senkungen bei der Unterfahrung der innerstädtischen Gebäude zu begrenzen. Diese Situation war bei der Unterfahrung des Kriegsbergs nicht gegeben, da hier keine Bebauung vorlag.



8 View on portal wall Kriegsberg
Blick auf die Anschlagwand Kriegsberg



9 Heading central station south, full face excavation, excavation and support
 Anfahrbereich Hbf. Süd, Vollausbuch, Ausbruch und Sicherung

are not considered in the comparison, since the driving method (sidewall heading or full face excavation) does not have a significant impact on the number of these. Significantly less shotcrete was used in the full face excavation in the "central station south approach area". Due to the elimination of the temporary support of the sidewall galleries, the shotcrete quantities were reduced by 6700 m³. This corresponds to a saving of 40% (Fig. 11). The savings in reinforcement are even more significant. As a result of the reduced shotcrete support and the statically more favorable cross-section in the full face excavation (cf. Chapter 3), 827 tons less reinforcing steel were installed in the "central station south approach area". This corresponds to a saving of 73% (Fig. 11). In contrast, significantly more face anchors were installed in the "central station south approach area". On the one hand, this is due to the larger working face area to be secured. On the other hand, a particularly strong temporary face support had to be installed in this area in order to limit the subsidence when driving underneath the urban buildings. This situation did not exist for the tunnels underneath the "Kriegsberg", since there were no buildings there. For purely structural reasons, it would also have been possible to install a smaller number of face anchors in the "central station south approach area", if there would have been no buildings. Under the same conditions with regard to buildings on ground surface, the significantly higher consumption of 623 t (+ 410%) of anchor steel in the "central station south approach area" would therefore be significantly lower (Fig. 11). Overall, this comparison based on a real project example shows that full face excavation results in large savings in shotcrete and reinforcing steel. To a certain degree this is offset by a higher consumption of face anchors. In total, however, there is a saving in steel, which would

Aus rein statischen Gründen wäre auch beim Anfahrbereich Hbf. Süd ohne Bebauung der Einbau einer geringeren Anzahl von Ortsbrustankern möglich gewesen. Bei gleichen Verhältnissen hinsichtlich der Bebauung würde der deutlich höhere Verbrauch von 623 t (+ 410 %) Ankerstahl im Anfahrbereich also signifikant geringer ausfallen (Bild 11). Insgesamt ergibt dieser Vergleich anhand eines realen Projektbeispiels, dass sich durch den Vollausbuch große Einsparungen an Spritzbeton und Bewehrungsstahl ergeben. Dem gegenüber steht ein höherer Verbrauch an Ortsbrustankern. In der Summe liegt jedoch eine Einsparung an Stahl vor, die noch höher ausfiele, wenn die Verhältnisse hinsichtlich der zu unterfahrenden Bebauung vergleichbar gewesen wären (Bild 11). Ergänzend ist zu berücksichtigen, dass der Abbruch, Abtransport und die Entsorgung der temporären Sicherungsmittel (Ulmenstiele/Kalottensohle) beim Vollausbuch entfällt. Insgesamt ist der Vollausbuch hinsichtlich der CO₂-Emissionen, des Energie- und Rohstoffbedarfs und der Kosten also deutlich günstiger zu bewerten.



10 Heading central station south, excavation of invert area
 Anfahrbereich Hbf. Süd, Sohlaushub

have been even higher if the conditions with regard to urban structures at ground surface had been comparable (Fig. 11). It should also be taken into account that demolition, removal and disposal of the temporary support measures (sidewall galleries) are not required for full face excavation. Overall, full face excavation is therefore significantly more favorable in terms of carbon footprint, energy and raw material consumption and costs.

5 Single-Lining Construction

A further, significant reduction in the consumption of concrete and steel for conventional construction of traffic tunnels would be possible if no reinforced concrete inner lining were installed. Corresponding experience is available. For example, the machine caverns of hydropower plants have been supported with shotcrete only above the level of assembly platforms for turbines, generators and pumps for decades. The roof and walls of the machine cavern of the pumped storage plant Wehr operated by the Schluchseewerke AG in the southern Black Forest, for example, have been stable for about 60 years, and no damage is known. The cavern was excavated in a gneiss similar to the so-called Albtal-granite and supported with reinforced shotcrete and rock nails and locally with prestressed anchors. The groundwater is lowered in the powerhouse area [7, 8].

The Carmel road tunnels in Haifa, Israel, consists of two dual-lane tunnel tubes with 3.2 km length on the western side and 1.6 km length on the Eastern side. The tunnels were excavated by blasting and supported with steel fibre reinforced shotcrete with local additions of structural steel mesh. The tunnels were drained and constructed without a reinforced concrete inner lining. For most of the length, the tunnel floors were constructed horizontally and without support (see, for example, Fig. 12). The bedrock consists mainly of dolomites and limestones with bedding parallel discontinuities [12]. The tunnels have been in operation for more than 10 years.

5 Einschalige Bauweise

Eine weitere, deutliche Reduktion des Verbrauchs von Beton und Stahl im konventionellen Verkehrstunnelbau wäre möglich, wenn auf den Einbau einer Stahlbetoninnenschale verzichtet werden könnte. Entsprechende Erfahrungen liegen vor.

So werden die Maschinenkavernen von Wasserkraftanlagen bereits seit Jahrzehnten oberhalb des Montagepodiums für die Turbinen, Generatoren und Pumpen nur mit Spritzbeton gesichert. Das Gewölbe und die Wände der Maschinenkaverne des Pumpspeicherwerks Wehr der Schluchseewerke AG im Südschwarzwald beispielsweise ist seit ca. 60 Jahren standsicher, und es sind keine Schäden bekannt. Die Kaverne wurde in einem dem Albtal-Granit ähnlichen Gneis aufgefahren und mit bewehrtem Spritzbeton und Felsnägeln sowie örtlich mit Vorspannankern gesichert. Das Grundwasser wird im Krafthausbereich abgesenkt [7, 8].

Der Carmel Straßentunnel in Haifa, Israel, besteht aus jeweils zwei zweispurigen 3,2 km langen westlichen und 1,6 km langen östlichen Röhren. Die Tunnelröhren wurden im Sprengvortrieb aufgefahren und mit stahlfaserbewehrtem Spritzbeton mit örtlichen Zulagen von Baustahlgewebe gesichert. Die Tunnel sind dräniert und ohne Stahlbetoninnenschale ausgeführt worden. Auf dem größten Teil der Länge wurden die Tunnelsohlen horizontal und ohne Sicherung ausgeführt (siehe z. B. Bild 12). Das anstehende Gebirge besteht überwiegend aus gebankten Dolomiten und Kalksteinen [12]. Die Tunnel sind seit mehr als 10 Jahren in Betrieb.

Ein weiteres Beispiel für einen nur mit Spritzbeton gesicherten Tunnel ist der Flucht- und Rettungstollen des Hestenbergtunnels. Der 734 m lange Hestenbergtunnel der Westtangente Plettenberg in Nordrhein-Westfalen ist zweispurig und wird im Gegenverkehr befahren. Der Flucht- und Rettungstollen verläuft parallel zum Straßentunnel. Beide wurden nach der Spritzbetonbauweise in devonischen Sandsteinen, Schluffsteinen und Tonschiefern aufgefahren. Der Straßentunnel ist mit einer Stahlbetoninnenschale ausgekleidet. Der Rettungstollen ist mit einer 15 cm dicken, mit Baustahlgewebe bewehrten Spritzbetonschale gesichert und dräniert [13].

Vortriebe / Headings		Spritzbeton/ Shotcrete [m³]	Bewehrung/ Reinforcement [t]	Ortsbrustanker/ Face anchors [t]	Hinweis/ Remark
Kriegsberg	Ulmenstollen/ Sidewall heading	16.850	1.130	152	Keine Wohnbebauung/ No relevant houses on surface
Anfahrbereich Hbf Süd/ Central Station South	Vollausbruch/ Full face excavation	10.150	303	775	Innerstädtische Bebauung Dense urban dvpt. on surface
Differenz/ difference		-6.700 (-40%)	-827 (- 73%)	+623 (+ 410%)	zusätzliche Ortsbrustanker wg. Bebauung addtl face anchors due to urban buildings

11 Headings Kriegsberg and Central Station South, Comparison of shotcrete and steel quantities

Vortriebe Kriegsberg und Anfahrbereich Hbf. Süd, Vergleich Mengen Spritzbeton und Stahl

Credit/Quelle: WBI



12 Carmel Tunnels, Portal Rupin
Carmel Tunnel, Portal Rupin

Another example of a tunnel secured only with shotcrete is the escape and rescue tunnel of the Hestenberg Tunnel. The 734 m long Hestenberg Tunnel forms part of the Eastern by-pass of the city of Plettenberg in North Rhine-Westphalia, Germany. It has two lanes and is used by two-way traffic. The escape and rescue tunnel runs parallel to the road tunnel. Both were excavated by conventional means in Devonian sandstones, siltstones and clay shales. The road tunnel is lined with a reinforced concrete inner lining. The rescue tunnel is supported with a 15 cm thick shotcrete membrane reinforced with a structural steel mesh, and it is drained [13].

The above mentioned examples show that, under certain conditions, drained tunnels can be permanently supported with a shotcrete membrane. As already explained, bending moments and shear forces occur only to a minor extent in shotcrete membranes, when the tunnel cross-section is appropriately designed – in particular rounded out. In these cases, no static reinforcement is required. This makes it possible to produce a

Die genannten Beispiele zeigen, dass dränierte Tunnel unter bestimmten Bedingungen dauerhaft mit einer Spritzbetonschale gesichert werden können. Wie bereits erläutert, treten bei entsprechender Gestaltung – insbesondere Ausrundung – des Tunnelquerschnitts in Spritzbetonschalen nur untergeordnet Biegemomente und Querkräfte auf. In diesen Fällen ist keine statische Bewehrung erforderlich. Dies ermöglicht die Herstellung eines Spritzbetons hoher Qualität, so dass auch eine wasserdichte Ausbildung möglich erscheint. Eine Bemessung gegen Wasserdruck dürfte auch ohne Bewehrung möglich sein.

Vor diesem Hintergrund sollte man im Interesse des Klimaschutzes sowie der Energie- und Kosteneinsparungen an solchen Lösungen arbeiten.

6 Einfluss des Baugrundmodells

Wie eingangs bereits erwähnt, spielt der Baugrund als wesentliches tragendes Element eine entscheidende Rolle bei der Planung von Tunnelbauwerken. Damit ist auch die wirklichkeitsnahe Modellierung des Baugrunds von erheblicher

high quality shotcrete, so that a watertight design also appears possible. Design against water pressure should also be possible without reinforcement. Against this background, we should work on such solutions in the interest of climate protection and energy and cost savings.

6 Influence of the Ground Model

As already mentioned at the beginning, the ground plays a decisive role in the design of tunnel structures as an essential load-bearing element. Thus, the realistic modeling of the ground is of considerable importance. For the description of rock masses, simplifying classification methods are often used internationally, and unfortunately increasingly also in the German-speaking countries. Frequently, characteristic rock mass parameters are also derived on the basis of the Hoek-Brown model, in which isotropic conditions are assumed. This way, the usually existing anisotropy of the rock mass is neglected. This has already been discussed in detail in [6] and [8], for example. The effects of such ground model on the topics discussed in this article will be shown below using the example of an excavation pit.

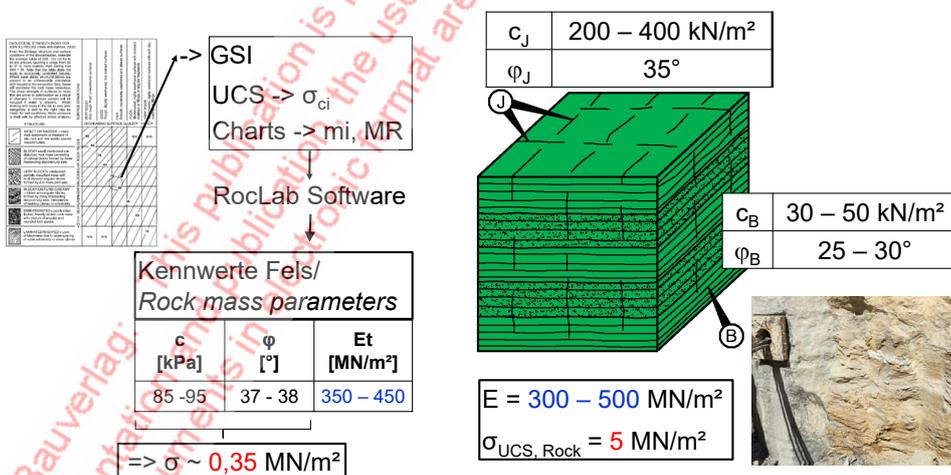
For the stations of the Green Line of the metro in Qatar, numerous excavation pits were built in tertiary limestone. The modeling of the rock mass was explained in detail in [6] and is therefore only presented in very brief form below. For further details, please refer to [6]. The different approaches are exemplarily explained with the aid of a geologic unit called Midra Shale. This is a limestone that shows a pronounced horizontal bedding, with partially small spacing, and steeply dipping joints (photo in Fig. 13). At that time, the experts initially involved in the

Bedeutung. Zur Beschreibung von Fels werden im internationalen Umfeld – und leider vermehrt auch im deutschsprachigen Raum – häufig vereinfachende Klassifizierungsmethoden verwendet. Oft werden Kennwerte auch auf Basis der Modelle von Hoek-Brown abgeleitet, in denen von isotropen Verhältnissen ausgegangen wird. Die in der Regel vorliegende Anisotropie des Felses wird dabei vernachlässigt. Dies wurde beispielsweise in [6, 8] bereits ausführlich diskutiert. Welche Auswirkungen diese Art der Modellierung des Baugrunds auf das hier behandelte Thema hat, wird nachstehend anhand des Beispiels einer Baugrube aufgezeigt.

Für die Stationen der U-Bahn-Linie Green Line in Katar wurden zahlreiche Baugruben im tertiären Kalkstein gebaut. Die Modellierung des Baugrunds wurde in [6] ausführlich erläutert und wird deshalb nachfolgend nur noch in sehr kurzer Form dargestellt. Für weitere Angaben wird auf [6] verwiesen. Die unterschiedlichen Betrachtungsweisen werden hier beispielhaft anhand eines Schichtglieds, des Midra Shales, erläutert. Es handelt sich um einen Kalkstein, der eine ausgeprägte, teilweise engständige horizontale Schichtung und steil stehende Klüfte aufweist (Foto in Bild 13).

Von den am Bau zunächst beteiligten Fachleuten wurden die Kennwerte des Felses seinerzeit auf Grundlage des Hoek-Brown Bruchkriteriums ermittelt [14]. Der Fels wird dabei wie ein homogenes, isotropes Material betrachtet. Die für den Midra Shale ermittelten Kennwerte sind in Bild 13 links dargestellt. Es werden vergleichsweise geringe isotrope Festigkeiten angegeben, die in der Größenordnung der Scherfestigkeit der näherungsweise horizontalen, schichtparallelen Trennflächen liegen.

Dahingegen haben die Autoren auf Bitte der ausführenden Unternehmung eigene Betrachtungen unter Berücksichtigung der Anisotropie der Festigkeit und Verformbarkeit des Felses



GSI – Hoek-Brown [14]

AJRM

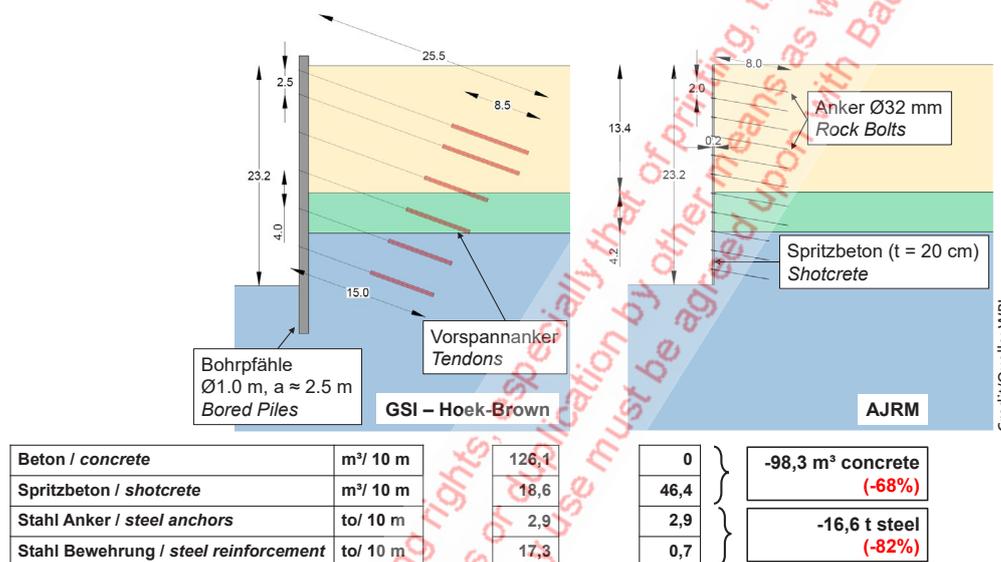
13 Green Line, Qatar, Midra Shale, Rock mass parameters based on Hoek-Brown [14] in comparison with AJRM [16, 17]

Green Line, Katar, Midra Shale, Kennwerte nach Hoek-Brown [14] im Vergleich zu AJRM [16, 17]

Credit/Quelle: WBI

14 Green Line, Qatar, Support of construction pit dimensioned with parameters based on Hoek-Brown [14] in comparison with AJRM [6, 9] and resulting concrete and steel quantities

Green Line, Katar, Baugrubensicherung auf Basis von Kennwerten nach Hoek-Brown [14] im Vergleich zu AJRM [6, 9] sowie daraus resultierende Mengen an Beton und Stahl



construction, determined the characteristic parameters of the rock mass on the basis of the Hoek-Brown failure criterion [14]. The rock mass is considered as a homogeneous, isotropic material. The characteristic parameters determined for the Midra Shale are shown in Figure 13 on the left. Comparatively small isotropic strengths are given, which are in the order of magnitude of the shear strength along the approximately horizontal bedding parallel discontinuities.

At the request of the contractors, the authors carried out their own considerations taking into account the anisotropy of the strength and deformability of the rock mass (Anisotropic Jointed Rock Model AJRM, [6, 8]). Due to the mentioned bedding and fracturing of the Midra Shale, there is an anisotropy in strength, which is taken into account in the AJRM by considering the strength of the intact rock on the one hand and a reduced shear strength along the discontinuities on the other hand (cf. Fig. 13, right). An isotropic deformability in the elastic range was assumed in the given case.

The deformation modulus is of a similar order of magnitude for both approaches. However, the comparison of the strength characteristics according to AJRM with the strength characteristics obtained with the planner's approaches based on Hoek-Brown shows very clear differences. As already mentioned, the planner modelled the rock mass according to Hoek-Brown homogeneously isotropic with strengths in the order of magnitude of the shear strength along the bedding-parallel discontinuities. It was thus modelled more or less like a soil. This does not take account of the actual conditions and, especially in combination with the horizontal bedding, leads to a significant overdimensioning of the support measures.

(Anisotropic Jointed Rock Modell AJRM, [6, 8]) durchgeführt. Aufgrund der erwähnten Schichtung und Klüftung des Midra Shale ergibt sich eine Anisotropie in der Festigkeit, die im AJRM berücksichtigt wird, indem einerseits die Festigkeit des Gesteins und andererseits reduzierte Scherfestigkeiten auf den Trennflächen berücksichtigt werden (vgl. Bild 13, rechts). Es wurde hier von einer isotropen Verformbarkeit im elastischen Bereich ausgegangen.

Der Verformungsmodul liegt bei beiden Ansätzen in einer ähnlichen Größenordnung. Der Vergleich der Festigkeitskennwerte nach AJRM mit den Festigkeitskennwerten, die mit den Ansätzen des Planers auf der Grundlage von Hoek-Brown ermittelt wurden, zeigt jedoch sehr deutliche Unterschiede. Der Fels wurde vom Planer, wie bereits erwähnt, nach Hoek-Brown homogen-isotrop mit Festigkeiten in der Größenordnung der Scherfestigkeit der schichtparallelen Trennflächen modelliert. Er wurde damit annähernd wie ein Boden betrachtet. Dies trägt den tatsächlichen Verhältnissen nicht Rechnung und führt insbesondere bei der hier vorliegenden horizontalen Schichtung zu einer deutlichen Überdimensionierung der Sicherungsmaßnahmen.

Bild 14 zeigt einen Vergleich der Baugrubensicherung, die sich basierend auf den vorstehend skizzierten Baugrundmodellen bei gleichen Lastansätzen ergeben. Bei Modellierung des Felses als homogenes, isotropes Material mit geringer Festigkeit (Planer) ergibt sich eine Sicherung mit einer aufgelösten Bohrpfehlwand. Die Bohrpfähle, die einen Durchmesser von 1 m besaßen, wurden alle 2,5 m bis 4 m mit 15 bis 25,5 m langen Vorspannankern rückverankert (vgl. Bild 14, links). Dahingegen führt die wirklichkeitsnahe Modellierung des Felses unter Berücksichtigung der Festigkeitsanisotropie nach dem AJRM zu einer deutlich geringeren Baugrubensicherung mit 20 cm Spritzbeton und bis zu 8 m langen, schlaffen

Figure 14 shows a comparison of the excavation pit support, which results from the above outlined ground models, if the same loads are assumed. Modeling the rock mass as a homogeneous, isotropic material with low strength (designer) results in a support with a discontinuous bored pile wall. The bored piles, which had a diameter of 1 m, were tied back every 2.5–4 m with 15–25,5 m long prestressed anchors (see **Fig. 14**, left). In contrast, the realistic modeling of the rock mass, taking into account the strength anisotropy according to the AJRM, leads to a significantly less extensive excavation pit support with 20 cm shotcrete and up to 8 m long rock nails arranged in a 2 m x 3 m grid (**Fig. 14**, right).

The quantities of concrete, shotcrete, anchor steel and reinforcing steel required in each case for the two differently planned excavation pit supports were determined and compared in **Figure 14**, below. As expected, the realistic modeling of the rock mass leads to considerable savings: about 68% less concrete and 82% less steel are required to support the excavation pit.

This example makes the importance of realistic ground modeling for carbon footprint, energy and raw material consumption and construction costs very clear. It should be taken as an opportunity to open up to the approaches for realistic modeling of rock masses, which are proven methods for more than 40 years by now [6, 8], and to apply them to an increasing degree.

7 Cut-and-Cover Versus Mining Method

In connection with infrastructure projects, existing infrastructures often have to be undercut. For cost and safety reasons, the undercutting of roads at small overburden is often planned with the cut-and-cover method, combined with correspondingly complicated traffic diversions and obstructions. In some cases, however, mined tunnel solutions have already been implemented (see, for example, [16–19]). This can have advantages also for the topic dealt with in the given article, as demonstrated by a project example.

For the aforementioned Green Line of Qatar Metro, numerous underpasses were planned under heavily trafficked, multi-lane roads using the cut-and-cover method. The authors were allowed to redesign some of these underpasses for application of the mining method on behalf of the contractors [16, 17]. An example of this type is a four-tube structure connecting to the technical building for ventilation and air conditioning of the subway. Originally planned as cut-and-cover construction, after a re-design it was built according to the mining method underneath a busy eight-lane main road at an overburden of about 5 m (**Fig. 15**). Details on the project and planning can be found in [17].

Figure 16 shows a comparison of the tunnel cross-sections

Ankern, die in einem Raster von 2 m x 3 m angeordnet werden (**Bild 14**, rechts).

Für die beiden unterschiedlich geplanten Baugrubensicherungen wurden die jeweils erforderlichen Mengen an Beton, Spritzbeton, Ankerstahl und Bewehrungsstahl ermittelt und in **Bild 14**, unten gegenübergestellt. Erwartungsgemäß führt die wirklichkeitsnahe Modellierung des Felses zu erheblichen Einsparungen: Es sind etwa 68 % weniger Beton und 82 % weniger Stahl zur Sicherung der Baugrube erforderlich.

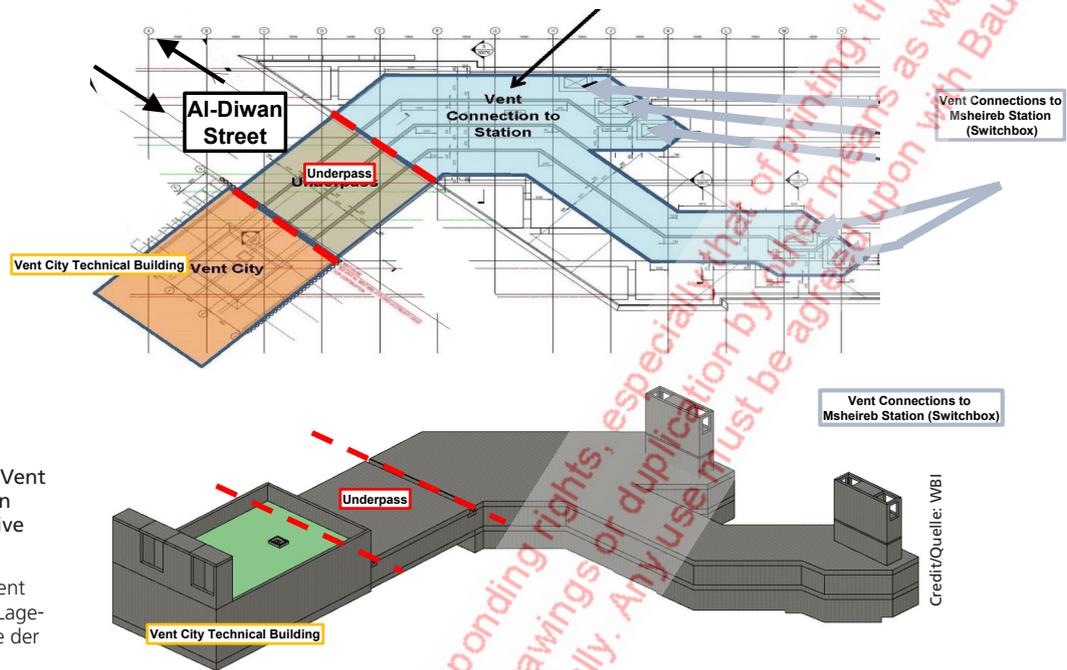
Dieses Beispiel macht die Bedeutung einer wirklichkeitsnahen Modellierung des Baugrundes für die CO₂-Emissionen, den Energie- und Rohstoffbedarf und die Baukosten sehr deutlich. Es sollte zum Anlass genommen werden, sich den seit mehr als 40 Jahren erprobten Ansätzen für die wirklichkeitsnahe Modellierung des Felses [6, 8] zu öffnen und sie vermehrt zur Anwendung zu bringen.

7 Offene Bauweise versus bergmännische Bauweise

Im Zusammenhang mit Verkehrsinfrastrukturprojekten müssen häufig bestehende Infrastrukturen unterfahren werden. Häufig wird bei der Unterfahrung von Straßenzügen mit geringer Überlagerung aus Kosten- und auch aus Sicherheitsgründen eine offene Bauweise mit entsprechend komplizierten Verkehrsumlegungen und Behinderungen geplant. In einigen Fällen wurden jedoch auch schon bergmännische Lösungen ausgeführt (siehe beispielsweise [16–19]). Dass dies Vorteile für die hier behandelte Thematik haben kann, wird ebenfalls an einem Projektbeispiel aufgezeigt.

Für die bereits erwähnte U-Bahn-Linie Green Line in Katar waren zahlreiche Unterführungen unter stark befahrenen, mehrspurigen Straßen in offener Bauweise geplant. Einige dieser Unterführungen durften die Autoren im Auftrag der ausführenden Baufirmen für eine bergmännische Bauweise umplanen [16, 17]. Ein Beispiel dieser Art ist ein vierröhriges Verbindungsbauwerk zum technischen Gebäude für die Belüftung bzw. Klimatisierung der U-Bahn. Ursprünglich in offener Bauweise geplant, wurde es nach einer Umplanung unter einer achtspurigen stark befahrenen Hauptstraße mit etwa 5 m Überlagerung in bergmännischer Bauweise gebaut (**Bild 15**). Details zu Projekt und Planung können [17] entnommen werden.

Bild 16 zeigt eine Gegenüberstellung der Tunnelquerschnitte für die offene und die bergmännische Bauweise sowie die zugehörigen erforderlichen Betonvolumina. Alleine durch die Änderung des Tunnelquerschnitts ergibt sich eine Einsparung von 26 % des Betons. Hinzu kommen erhebliche Einsparungen an Stahl aufgrund deutlich geringerer Bewehrungsmengen, die hier nicht näher quantifiziert werden. Darüber hinaus kann die für die offene Bauweise erforderliche Sicherung der



15 Green Line, Katar, Vent City, schematic plan view and perspective of the structures

Green Line, Katar, Vent City, schematischer Lageplan und Perspektive der Bauwerke

designed for the cut-and-cover method and the mining method as well as the corresponding required concrete volumes. Only the change in tunnel cross-section results in a saving of 26% of concrete. In addition, there are considerable savings in steel due to significantly lower reinforcement quantities, which are not quantified in more detail here. Furthermore, the support of the construction pit required for the cut-and-cover method can be completely eliminated, which in turn leads to significant material savings. Also the excavation volumes are significantly reduced when the mining method is applied. Furthermore, the CO₂ emissions and indirect costs caused by traffic diversion, traffic obstructions and the resulting congestion are eliminated.

This example makes it clear that, in terms of CO₂ emissions as well as energy and raw material consumptions, it may well make sense to consider and investigate the mining method as an option for undercutting also at small overburden heights.

8 Summary and Conclusions

Climate protection and the geopolitical situation pose major challenges for our society. To protect the climate, we must reduce CO₂ emissions and cut the consumption of fossil energies. The war in Ukraine makes us very aware of our economy's dependence on fossil energies and their availability and costs, making savings even more urgent than they already have been before. Likewise, the relevance of supply chains and availability of raw materials is becoming more and more obvious – also for the construction industry.

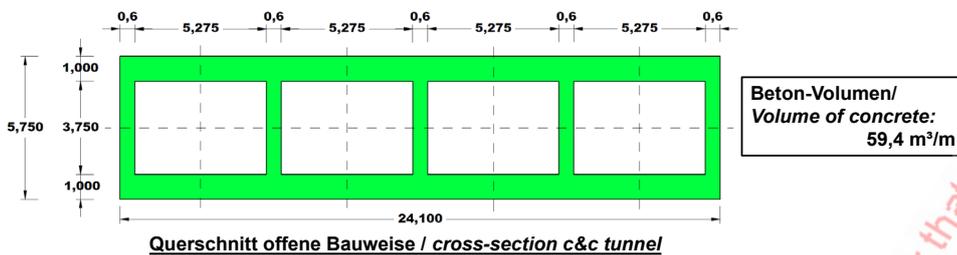
Baugrube komplett entfallen, was wiederum zu deutlichen Materialeinsparungen führt. Auch die Aushubvolumina sind bei der bergmännischen Bauweise deutlich geringer. Weiterhin entfallen die durch Verkehrsumlegung, Verkehrsbehinderungen und daraus resultierenden Staus bedingten CO₂-Emissionen und indirekten Kosten.

Dieses Beispiel macht deutlich, dass es im Hinblick auf die CO₂-Emissionen sowie den Energie- und Rohstoffbedarf durchaus sinnvoll sein kann, bei Unterführungen auch die bergmännische Bauweise als Möglichkeit in Erwägung zu ziehen und zu untersuchen.

8 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

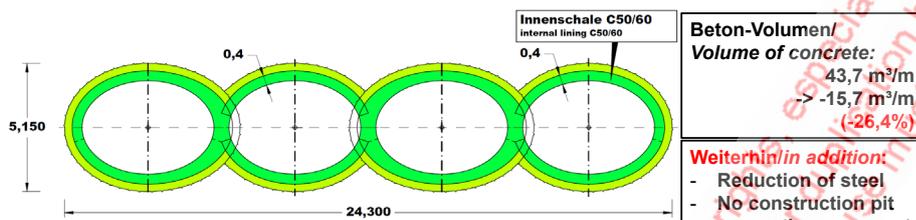
Der Klimaschutz und die geopolitische Situation stellen unsere Gesellschaft vor große Herausforderungen. Zum Schutz des Klimas müssen wir den CO₂-Ausstoß verringern und den Verbrauch fossiler Energien senken. Der Krieg in der Ukraine führt uns die Abhängigkeit unserer Wirtschaft von fossilen Energien und deren Verfügbarkeit und Kosten sehr deutlich vor Augen und macht Einsparungen noch dringlicher als sie bisher schon waren. Ebenso wird die Bedeutung der Lieferketten sowie der Verfügbarkeit von Rohstoffen auch für die Bauwirtschaft immer deutlicher. Allein durch die Verringerung des Bedarfs an Zement und Stahl kann im Tunnelbau ein erheblicher Beitrag zur Verringerung der CO₂-Emissionen, des Energie- und des Rohstoffbedarfs geleistet werden. Damit einher geht auch eine deutliche Reduzierung der Baukosten, was im Sinne des Wirtschaftlichkeitsgebots ist, dem die öffentliche Hand als Bauträger der Verkehrsinfrastruktur unterliegt.

Im vorliegenden Artikel werden Möglichkeiten aufgezeigt, im konventionellen Tunnelbau durch eine Optimierung des



**Beton-Volumen/
Volume of concrete:**
59,4 m³/m

Querschnitt offene Bauweise / cross-section c&c tunnel



**Beton-Volumen/
Volume of concrete:**
43,7 m³/m
> -15,7 m³/m
(-26,4%)

Weiterhin/in addition:
- Reduction of steel
- No construction pit excavation + support
- No traffic deviation

Querschnitt bergmännische Bauweise / cross-section mined tunnel

CreditQuelle: WBI

16 Green Line, Katar, Vent City, comparison of concrete quantities for cut-and-cover and mined tunnels

Green Line, Katar, Vent City, Vergleich Querschnitte und Betonmengen offene und bergmännische Bauweise

In tunnel construction, reducing the need for cement and steel already can make a significant contribution to reducing CO₂ emissions as well as energy and raw material requirements. This comes along with a significant reduction in construction costs, which is in line with the economic efficiency imperative to be followed by public authorities in charge of transport infrastructure. In this article, possibilities are presented to achieve such savings in conventional tunnel construction by optimizing the design. These possibilities are explained on the basis of project examples, and the achievable savings are exemplarily quantified.

One option is to optimize the cross-sectional shape of a tunnel in such a way that bending moments and shear forces are avoided. This leads to a considerable reduction in the support requirements. If, in addition, a full face excavation is planned and partial excavations and corresponding temporary support measures are thus avoided, then significant quantities of shotcrete and reinforcement can be saved. In addition, there are savings with regard to demolition, removal and disposal of the temporary support measures.

Furthermore, we should think about constructing single-shell shotcrete membranes as permanent linings. If, through appropriate planning, these are only stressed by normal forces, it is possible to dispense with reinforcement meshes, anchors and steel arches. The shotcrete can then be reinforced with steel fibres, it can be executed with a better quality and – possibly with the aid of additional measures – also watertight.

In terms of reducing CO₂ emissions as well as energy and raw material consumption, it may also make sense to investigate undercutting of existing infrastructure at

Entwurfs ebensolche Einsparungen zu erzielen. Diese Möglichkeiten werden anhand von Projektbeispielen erläutert und die erzielbaren Einsparungen beispielhaft quantifiziert.

Eine Möglichkeit ist es, die Querschnittsform eines Tunnels so zu optimieren, dass Biege- und Querkraftbeanspruchungen vermieden werden. Dies führt zu einer erheblichen Reduzierung des Sicherungsaufwands. Wenn man darüber hinaus einen Vollausschub vorsieht und somit auf Teilausbrüche und entsprechende temporäre Sicherungsmittel verzichtet, dann lassen sich deutliche Mengen an Spritzbeton und Bewehrung einsparen. Hinzu kommen Einsparungen hinsichtlich Abbruch, Abtransport und Entsorgung der temporären Sicherungsmittel.

Weiterhin sollten wir über den Bau einschaliger Spritzbetonschalen als dauerhafte Auskleidung nachdenken. Wenn diese gemäß einer entsprechenden Planung nur durch Normalkräfte beansprucht sind, ist es möglich, auf Bewehrungsmatten, Anker und Bögen zu verzichten. Der Spritzbeton kann dann mit Stahlfasern bewehrt, mit einer besseren Qualität und – ggf. unter Berücksichtigung von Zusatzmaßnahmen – auch wasserdicht ausgebildet werden.

Im Hinblick auf die Reduzierung der CO₂-Emissionen und des Energie- und Rohstoffbedarfs kann es sinnvoll sein, bergmännische Unterführungen von bestehender Infrastruktur bei geringer Überlagerung anstelle der gängigen offenen Bauweisen zu untersuchen.

Eine erhebliche Rolle für die wirtschaftliche und sichere Planung spielen die wirklichkeitsnahe Modellierung des Baugrunds sowie des Zusammenwirkens von Baugrund und Bauwerk und die dazugehörigen Verfahren zur Untersuchung der Standsicherheit. Sie stellen sozusagen eine Grundvoraussetzung dar. Sowohl die Baugrundmodelle als auch die Berechnungsverfahren stehen zur Verfügung und sind langjährig erprobt.

low overburden with the mining method instead of the more common cut-and-cover method.

A realistic modeling of the ground and of the interaction between ground and structure, and the corresponding procedures for stability analyses, play a significant role in economic and safe planning. They are, so to speak, a basic prerequisite. Both the ground models and the calculation methods are available and have been tested over many years.

This article does not claim to be exhaustive. It is rather our aim to point out possible optimizations and thus a possible contribution from owners and tunnel planners – a contribution that we would like to make, and we would like to initiate the discussion in this direction.

Der vorliegende Text stellt keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Vielmehr geht es uns darum, mögliche Optimierungen und damit einen möglichen Beitrag seitens der Bauherren und Tunnelplaner aufzuzeigen. Diesen Beitrag wollen wir gerne leisten, und wir möchten die Diskussion in diese Richtung anstoßen.

REFERENCES/LITERATUR

- [1] Sauer, J.: Ökologische Betrachtungen zur Nachhaltigkeit von Tunnelbauwerken der Verkehrsinfrastruktur. Dissertation am Lehrstuhl für Massivbau der Technischen Universität München. 16.03.2016. Download von: <https://mediatum.ub.tum.de/doc/1295092/document.pdf>, 03/2022.
- [2] EURAC Research: Ausbau Eisenbahnachse München – Verona – Brenner Basistunnel. Bereich Umweltplanung – Erstellung eines CO₂-Haushalts. Untersuchung der Nachhaltigkeit des Brenner Basistunnels im Hinblick auf seine CO₂-Emissionen. Innsbruck, Juni 2011.
- [3] vdz: Dekarbonisierung von Zement und Beton – Minderungspfade und Handlungsstrategien (Eine CO₂-Roadmap für die deutsche Zementindustrie). Download 03/2022: <https://www.vdz-online.de/dekarbonisierung>.
- [4] Leucker, R.; Schmitz, M.: Klimaschutz im Verkehrswegebau – Gesamtoptimierung oder interessenorientierte Segmentierung? In: Forschung + Praxis 56: STUVA-Tagung 2021.
- [5] <https://www.bauen-neu-denken.de>. Abruf in 03/2022.
- [6] Wittke, M.; Wittke-Schmitt, B.; Wittke-Gattermann, P.; Wittke, W.: Sichere und wirtschaftliche Planung und Ausführung von Tunnelbauwerken im klüftigen Fels nach der AJRM-Methode – Teile 1 und 2. In Zeitschrift Tunnel 3/2021 und 4/2021. Bauverlag BV GmbH, Gütersloh, 2021.
- [7] Wittke, W.: Felsmechanik, Grundlagen für wirtschaftliches Bauen im Fels. Springer-Verlag, Berlin 1984. ISBN 3-540-13016-0 / 0-387-13016-0. English Version: Wittke, W.: Rock mechanics – Theory and application with case histories. Springer: Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo, 1990. ISBN 3-540-52719-2 / 0-387-52719-2
- [8] Wittke, W.: Rock Mechanics based on an Anisotropic Jointed Rock Model (AJRM), Verlag Ernst & Sohn GmbH & Co. KG, Berlin 2014. ISBN 978-3-433-03079-0.
- [9] Wittke, W.; Wittke-Schmitt, B.; Wittke-Gattermann, P.: Das Modell AJRM als Grundlage für wirtschaftliches und sicheres Planen und Bauen im klüftigen Fels. Vortrag anlässlich des 5. Felsmechanik- und Tunnelbautages im WBI-Center am 23.05.2019. WBI-Print 22, Weinheim, 2019. ISBN 978-3-00-063255-6.
- [10] Wittke, W.; Wittke, M. Druffel, R., Rath, A.; Osthoff, G.: Großquerschnitte im Anfahrbereich Hauptbahnhof Süd, Statische Berechnungen, Senkungsprognosen und Baubetriebliche Aspekte. Vortrag anlässlich des 5. Felsmechanik- und Tunnelbautages im WBI-Center am 23.05.2019. WBI-Print 22, Weinheim, 2019. ISBN 978-3-00-063255-6.
- [11] Erichsen, C.: Auffahren großer Tunnelquerschnitte unter dem Kriegsberg. Vortrag anlässlich des 2. Felsmechanik- und Tunnelbautages im WBI-Center am 13.04.2016. WBI-Print 19, Weinheim, 2016. ISBN 978-3-00-053545-1.
- [12] Wittke, W.; Wittke, M.; Grosz, Tibi: Planung und Bau der Carmel Tunnel in Haifa/Israel. In: Forschung und Praxis 42. Bauverlag, 2007.
- [13] WBI: Plettenbergtunnel und Flucht- und Rettungsstollen. Planung. 2004 – 2006. (Unveröffentlicht).
- [14] Green Line in Katar: Baugrube Station Education City South East. Projektunterlagen von anderen Projektbeteiligten (Planer), 2014. Unveröffentlicht.
- [15] www.rocsience.com/documents/pdfs/uploads/8079.pdf: RocLab 1.0 Rock Mass strength analysis using the generalized Hoek-Brown failure criterion. (Abgerufen am 27.04.2021, 11.25 Uhr)
- [16] Wittke-Schmitt, B.; Küpper, H.-J.; Wenkenbach, H.: Green Line in Qatar, bergmännische Unterfahrung einer 8spurigen Straße in Doha. Vortrag anlässlich des 3. Felsmechanik- und Tunnelbau-Tags im WBI-Center am 11.05.2017. WBI-PRINT 20, Weinheim, 2017. ISBN 978-3-00-057227-2.
- [17] Wenkenbach, H.; Wittke, M.; Wittke-Schmitt, B.; Küpper, H.-J.: Green Line Katar: Konventionelle Tunnelvortriebe, Planung und Ausführung auf der Grundlage der AJRM-Methode. Veröffentlichung in der Zeitschrift Tunnel, 05/2018, S. 16–26, Bauverlag BV GmbH, Gütersloh.
- [18] Erichsen, C.; Druffel, R. Boetcher, A.: Kreuzungsbauwerk Ehmannastraße, räumliche Statik und Bemessung. Vortrag anlässlich des 4. Felsmechanik- und Tunnelbau-Tags im WBI-Center am 07.06.2018. WBI-PRINT 21, Weinheim, 2018. ISBN 978-3-00-060352-5.
- [19] Wittke, W.; Strangfeld, W.; Druffel, R.: Bergmännische Unterfahrung der Ehmannastraße, Juchtenkäfer über der Firste und Mineralwasser unter der Sohle. Vortrag anlässlich des 2. Felsmechanik- und Tunnelbau-Tags im WBI-Center am 13.04.2016. WBI-PRINT 19, Weinheim, 2016. ISBN 978-3-00-053545-1.