

G. Girmscheid

Hochleistungsvortrieb im Tunnelbau – Industrialisierungstendenz im Sprengvortrieb

Zusammenfassung Der Hochleistungssprengvortrieb erfordert, dass alle einzelnen Arbeitsphasen dieser Bauprozesskette optimiert und als ein System mit aufeinander folgenden und parallelen Abläufen betrachtet werden. Die Integration von logistischen Nachläufer-Systemen ermöglicht eine Erhöhung der Leistung im rückwärtigen Bereich durch Parallelisierung und Trennung der Bau- und Transportprozesse sowie Zusammenfassung der Unterstützungsinfrastruktur. Weiterhin ist es erforderlich, im Vortriebsbereich die Sprengtechnik und die teilweise Roboterisierung der verschiedenen Gerätesysteme in einen integrierten Prozess einzubringen.

High performance tunneling - Improvements in the drill and blast method

Abstract The high performance drill and blast method requires that all individual working elements of the construction process chain are optimized and considered as a system with sequential and parallel actions. The advantage of the integration of the logistic backup systems enables an increase in performance. It is further required to improve the logistics, the blast techniques, and the partial robotisation of all different systems in an integrated process.

1 Einleitung

Der Tunnelbau, speziell der Vortrieb mit neuen und gebrauchten TBM, hat in den letzten drei Jahrzehnten zugenommen. Vor 25 Jahren war die Frage: „Kann der Tunnel mit einer TBM gebaut werden?“ Heute dagegen stellt sich die Frage: „Können wir es uns leisten, keine TBM einzusetzen?“ Deshalb steht der Sprengvortrieb in einem intensiven Wettbewerb mit dem maschinellen Vortrieb.

Im Prinzip kann man das System aus TBM mit Nachläufer (Tabelle 1) als hochmechanisierte "Tunnelfabrik" mit gut organisierter Logistik ansehen. Der Vortrieb mittels Tunnelbohrmaschine besitzt jedoch eine eingeschränkte Flexibilität, insbesondere wenn der Querschnitt in der Größe und/oder von der Form eines Kreises abweicht. Ferner ist eine relativ lange Mobilisierungszeit aufgrund der langen Lieferfristen und Installation der TBM vor Ort zu beachten. Die Investitionskosten für die TBM und den Nachläufer sind sehr hoch. Jedoch hat die TBM-Technologie einen ziemlich hohen Mechanisierungs- und Automatisierungs-

stand erreicht. Ferner trägt sie zur Humanisierung und Erhöhung der Arbeitssicherheit im Untertagbau bei. Weiterhin ist sie durch sehr hohe Leistungen und geringe Gesamtarbeitskosten charakterisiert. Der Sprengvortrieb (Tabelle 1) auf der anderen Seite ist charakterisiert durch mechanisierte und teilweise manuelle, zyklische Arbeit. Das Niveau der mechanisierten und automatisierten Prozesse ist immer noch gering. Während der Installation der temporären Sicherung und des Schutterns ist die Arbeitssicherheit in den noch ungesicherten Bereichen, direkt nach dem Sprengen, wegen der Möglichkeit von Steinfällen kritisch. Andererseits ist der Sprengvortrieb ein sehr anpassungsfähiger und flexibler Bauprozess hinsichtlich Ausbruch jeglicher Querschnittsformen, Zwischenaufweitungen und der Installation verschiedener Arten der temporären Sicherung. Weiterhin ist diese Methode durch eine recht kurze Mobilisierungszeit aufgrund des Standardequipments charakterisiert. Im Vergleich zur TBM-Technologie sind die Leistungen in vielen Fällen geringer, die Gesamtarbeitskosten höher, aber die Gesamtinvestitionskosten niedriger. Zusammenfassend ist festzustellen: Die TBM-Technologie zeigt meist eine exzellente Kosteneffizienz bei einer Tunnellänge von mehr als drei Kilometern. Es gibt ungenutzte Leistungspotentiale bezüglich der Automatisierung des Sicherungseinbaus und der Erhöhung der verfügbaren Bohrzeit durch die Nutzung robusterer und dauerhafterer Schneidwerkzeuge (Standzeit). Die Sprengtechnologie weist bei Tunneln mit einer Länge von mehr als drei Kilometern meist eine mittlere Kosteneffizienz auf, die, verglichen mit der der TBM-Technologie, mit zunehmender Tunnellänge abnimmt. Der Sprengvortrieb besitzt noch ein ziemlich hohes, ungenutztes Wirtschaftlichkeitspotential hinsichtlich gleichzeitiger, verbesserter zyklischer Arbeit und besonders hinsichtlich der Verbesserung der Logistik im rückwärtigen Bereich des Vortriebs.

Tabelle 1. Vergleich zwischen TBM- und Sprengtechnologie
Table 1. Comparison between TBM and drill and blast technology

Grundsätze der TBM	Grundsätze des Sprengens
<ul style="list-style-type: none"> - "Tunnelfabrik" – hoch mechanisiert - limitiert flexibler Prozess, z.B. konstanter Tunnelquerschnitt - hohes Niveau in Bezug auf: <ul style="list-style-type: none"> - Automatisierung mechanisierter Prozesse - Humanisierung der Arbeit / Arbeitssicherheit - lange Mobilisationszeit infolge langer Herstellungs- und Installationszeit - hohe Leistung - geringe Gesamtarbeitskosten - hohe Gesamtinvestitionskosten 	<ul style="list-style-type: none"> - handwerkliche zyklische Arbeit - äusserst anpassungsfähig, flexibler Prozess - mittleres Niveau in Bezug auf: <ul style="list-style-type: none"> - Automatisierung mechanisierter Prozesse - Humanisierung der Arbeit - Arbeitssicherheit - kurze Mobilisationszeit infolge einfacher Standardausrüstungskomponenten - mittlere Leistung - hohe Gesamtarbeitskosten - geringe Gesamtinvestitionskosten
<p>Zusammenfassung:</p> <ul style="list-style-type: none"> - ausgezeichnete Kosteneffizienz bei Tunneln länger als ≈ 3 km - weitere Leistungspotentiale hinsichtlich: <ul style="list-style-type: none"> - Automatisierung - erhöhter Bohrzeitverfügbarkeit 	<p>Zusammenfassung:</p> <ul style="list-style-type: none"> - mittlere Kosteneffizienz bei Tunneln länger als ≈ 3 km - ungenutzte Leistungspotentiale hinsichtlich: <ul style="list-style-type: none"> - gleichzeitiger, verbesserter zyklischer Arbeit - Logistik des rückwärtigen Bereiches

Prof. Dr.-Ing. Gerhard Girmscheid

Vorsteher des Institutes für Bauplanung und Baubetrieb
Professur für Baubetriebswissenschaften und Bauverfahrenstechnik
ETH Hönggerberg, CH-8093 Zürich

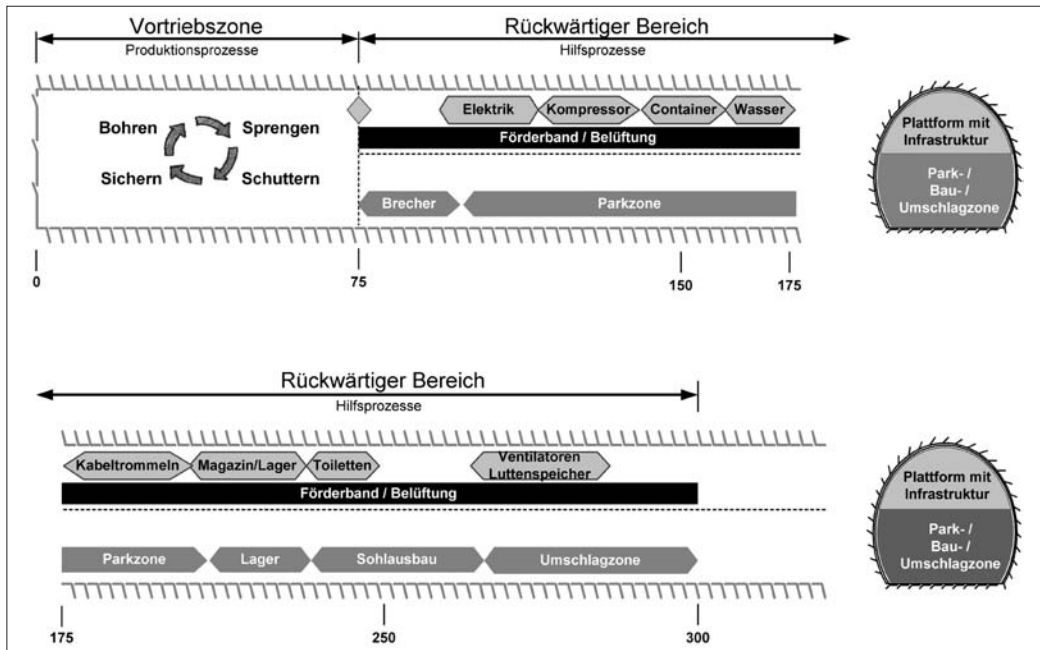


Bild 1. Konzept: Funktionale Bereiche des Sprengvortriebs mit Nachläufer - Logistiksysteme
Fig. 1. Concept: Functional areas of drill and blast with back up system - logistic system

2 Vergleich des Sprengvortriebs mit dem TBM-Vortrieb

Neben der Geologie beeinflussen die Randbedingungen wie Tunnellänge, Querschnitt und Bauprogramm maßgeblich die Wahl des Vortriebsverfahrens. Für den mechanischen Felsabbau werden heute Gripper-TBM, Schild- und Teleskopschild-TBM eingesetzt. Die Nachläufer dienen als Logistiktäger und Übergabestelle für den Materialumschlag. Je nach Tunnelquerschnitt werden für die Ver- und Entsorgung Streckenband, Gleis oder Pneubetrieb eingesetzt.

Der baubetriebliche Hauptunterschied des konventionellen, mechanisierten Sprengvortriebs gegenüber dem industrialisierten, mechanisierten TBM-Vortrieb liegt im Prozesszyklus bzw. in der Kontinuität. Bei TBM-Vortrieben ist ein Kreisprofil vorgegeben, das mit hoher Genauigkeit erstellt werden kann. Beim Sprengvortrieb kann das Profil, abweichend vom Kreisquerschnitt, auf die erforderliche Nutzungsprofilform abgestimmt werden. Allerdings muss, durch die sägezahnförmige Anordnung der Bohrlöcher, im ungünstigen Fall mit Überprofil von 10 - 25 % der Ausbruchquerschnittsfläche gerechnet werden, welches geschüttet und unter Umständen wieder mit Beton verfüllt werden muss. Der Wasserzufluss kann beim Sprengausbruch infolge Störung des Gesteinsverbandes doppelt so hoch sein wie beim TBM-Vortrieb. Beim Vortrieb mittels Sprengen muss im Brust- und Vortriebsbereich bedeutend mehr gesichert werden als bei einem TBM-Vortrieb. Es gibt Situationen, in denen ausschließlich eine Schild-TBM in Frage kommt. In den Fällen, in denen sowohl ein TBM als auch ein Sprengausbruch möglich ist, ist aufgrund einer Risikobetrachtung abzuwägen, wo die Vor- und Nachteile liegen bzw. welche Folgen und Kosten entstehen, wenn es zu unerwarteten oder unvorhersehbaren Störungen kommt. Die Häufigkeit von Unfällen sowie ihr Ausmaß ist für beide Methoden annähernd gleich groß [1].

Bei langen Tunneln und guten Gesteinsverhältnissen, wo hohe Vortriebsleistungen zu erwarten sind, wird der Sprengvortrieb sicherlich auch in Zukunft gegenüber einem TBM-Vortrieb nicht konkurrenzfähig sein. Bei komplexerer Geologie und Störzonen kann mit dem hoch industrialisierten Sprengvortrieb eine bedeutende Leistungssteigerung erreicht und dadurch eine neue Konkurrenzsituation geschaffen werden.

3 Effizienzsteigerungspotential

Der Sprengvortrieb ist sehr anpassungsfähig hinsichtlich Profilgeometrie und Geologie. Die Zykluszeiten werden durch die Abschlagslänge bestimmt, die wiederum von der Ausbruch- und Sicherungsklasse des Gebirges abhängt. Für die Einteilung in Ausbruch- und Sicherungsklassen sind der Umfang und der Einbauort der Ausbruchsicherung entscheidend. Die Sicherungsmaßnahmen sind je nach Klasse im Brustbereich, im Vortriebsbereich oder im rückwärtigen Bereich auszuführen. Die Abgrenzung zwischen den Bereichen hängt u.a. von der maximalen Ausbruchbreite im Profil ab. Die Behinderung im Vortrieb durch die Ausbruchsicherung nimmt mit sich verschlechterter Geologie von unbedeutend über leicht und erheblich bis stark zu. Bei stark gestörten Gesteinsverbänden werden die Sicherungsarbeiten leistungsbestimmend für den Vortrieb. Die Sicherung erfolgt mit Ankern und/oder Netzen, Spritzbeton bis hin zu schwerem Stahlbogeneinbau, Brustvernagelung und vorausseilenden Schirmgewölben.

Die Arbeitsschritte, die den Ablauf zwischen Ausbruch und Sicherung bestimmen, sind stets auf ihre Wirksamkeit und Wirtschaftlichkeit hin zu überprüfen. Obwohl eine gewisse Abstimmung erfolgt, werden kaum ineinander greifende Arbeitsschritte ausgearbeitet. Die Gründe liegen in den heute noch weitgehend handwerklich geprägten, teilweise mechanisierungsorientierten, sequentiellen Arbeitsprozessen eines aus vielen Teilleistungen zusammengesetzten Bauverfahrens [2, 3].

Um eine höhere Effizienz zu erreichen, müssen einerseits die Vorteile der Methode beibehalten und andererseits ihre ungenutzten Effizienzpotentiale gestaltet werden. Deswegen muss man die Flexibilität der Methode hinsichtlich Anpassungsfähigkeit auf Querschnittsformen und -größe sowie die Installation verschiedener Arten und Quantitäten an temporären Felssicherungen wahren. Zur Nutzung baubetrieblicher Leistungssteigerungspotentiale können folgende zwei Bereiche im Vortrieb identifiziert werden [4]:

- der Vortriebsbereich mit zyklischen Arbeitsvorgängen: Ausbruch, Schüttern, Einbau der ersten temporären Sicherungsmaßnahmen
- der rückwärtige Bereich für Vortriebsversorgung, zusätzliche Sicherungsmaßnahmen und Endausbau mit:

- gleichzeitiger Bewegung der Versorgungsinfrastruktur, bestehend aus Aggregaten, Einrichtungen/Anlagen usw., die dem Vortriebsprozess folgen
- Trennung der Materialflüsse und Versorgungsinfrastruktur von den Park-, Lager- und Arbeitszonen sowie dem Bereich des Tunnelsohleinbaus

Darüber hinaus müssen die Leistung und die Kosteneffizienz durch die Einführung industrialisierter Prozesse erhöht werden, d.h. durch Verwendung von hochmechanisiertem und automatisiertem, robustem und spezialisiertem Hochleistungsequipment in der Vortriebszone sowie Mechanisierung der gleichzeitigen Bewegungen der unterstützenden Infrastruktur im rückwärtigen Bereich. Heute wird jede einzelne Komponente wie Container, Hilfsaggregate etc. sowie das gesamte Material einzeln umgesetzt, um dem Vortrieb zu folgen. Es ist also nötig, die gleichzeitig stattfindenden Transport- und Arbeitsprozesse durch systematische Trennung von den Lager- und Arbeitsbereichen sowie den Transportflüssen im rückwärtigen Bereich zu organisieren. Außerdem sollte dies, durch Reduzierung der Schwerarbeit und Verbesserung der Luftqualität durch kontinuierliches Nachführen der Lüftungslutte, zur Humanisierung der Arbeitsbedingungen beitragen.

Welche Prozesse können industrialisiert und in den Sprengvortrieb implementiert werden? In **Bild 1** sind die Bereiche Vortriebszone und rückwärtiger Bereich mit den verschiedenen Funktionszonen, in denen die einzelnen Prozessabläufe stattfinden, identifiziert. Der moderne Produktionsprozess in der Vortriebszone ist heute weitgehend durch verschiedenste Arten von Spezialarbeitsgeräten für jeden zyklischen Arbeitsabschnitt geprägt. Die Arbeits- und Transportprozesse des rückwärtigen Bereichs werden durch eine aufgehängte Plattform organisiert. Infolge dieser Maßnahme können die Transport-, Hilfs- sowie die Arbeitsprozesse des Tunnelausbaus räumlich wie folgt getrennt werden, um parallele Abläufe zu ermöglichen:

- oberer Bereich mit Unterstützungsinfrastruktur, Ausbruchabtransport und Luftversorgungsleitungen, die in einzelnen funktionalen Zonen untergebracht sind
- unterer Bereich mit Park- und Lagerzonen, Sohlausbau und Umschlagzone für Belieferung und Abtransport von Material

4 Industrialisierung in der Vortriebszone

Die Ziele der Industrialisierung des Sprengvortriebs (**Bild 2**) fokussieren in der Vortriebszone auf die Verbesserung der zyklischen Vortriebsprozesse durch Mechanisierung und Roboterisierung des individuellen, robusten Equipments, eingeteilt für spezielle Aufgaben wie [4]:

- computergestütztes Hochleistungsbohren
- mechanisiertes, computer-gesteuertes Laden der Emulsionssprengstoffe
- mechanisiertes Schuttern mit Hochleistungs-Tunnelbaggern oder Seitenkippladern
- mechanisierte Installation der temporären Sicherung mit:

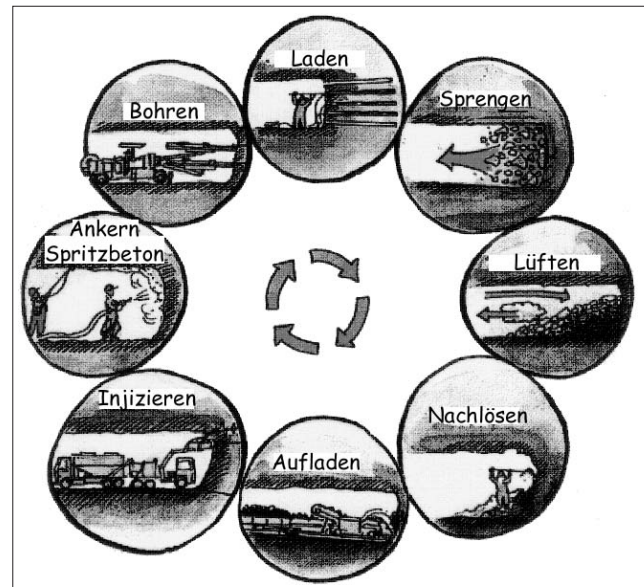


Bild 2. Zyklus des Sprengvortriebs

Fig. 2. Cycle of drill and blast heading

- computergesteuerten Ankerbohrgeräten
- mechanisiertem Versetzen der Stahlbogeneinbauten
- roboterisiertem Auftragen des Spritzbetons

4.1 Bohrtechnologie

Genaueres Bohren ist eine wesentliche Voraussetzung für ein profilgenaues Sprengergebnis mit einer optimalen Haufwerkszerkleinerung. Ein Bohrzyklus umfasst die Positionierung des Bohrgerätes, die Zuweisung des Sprengbildes (Bohrplan) zur aktuellen Stationierung und das Bohren der Bohrlöcher mit dem erforderlichen Umsetzen der Bohrrame.

Die neueste Jumbogeneration (**Bild 3**) mit zwei oder drei Bohrlafetten erzielt im halb und vollautomatischen, roboterisierten Betrieb sehr hohe Leistungen. Die Positionierung erfolgt via Tunnellaser manuell, doch wird das mittels CAD erstellte Bohrschema für die jeweiligen Standorte automatisch in den Prozessrechner des Jumbos eingelesen. Anhand der Gerätepositionierungsdaten berechnet der Bordrechner des Jumbos die Bohrposition und kann dann halb oder vollautomatisch das Bohrschema abbohren [4].

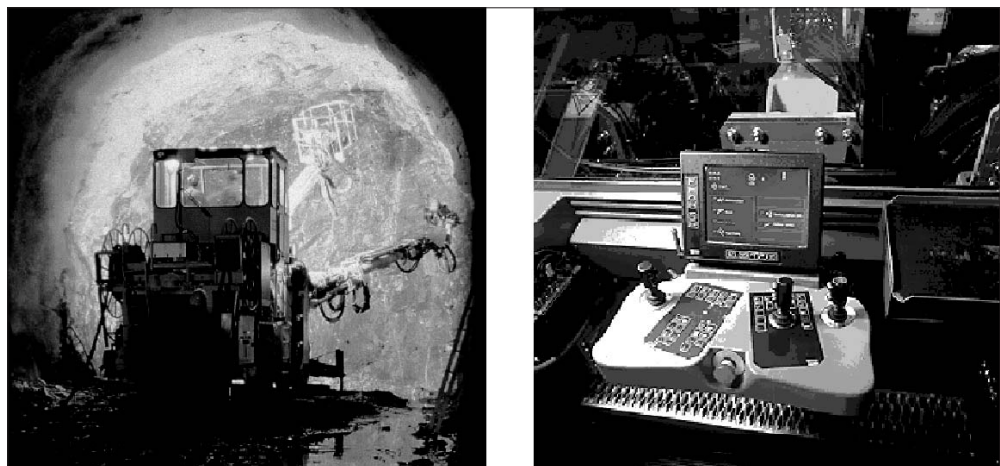


Bild 3. Vollautomatischer Bohrprozess

Fig. 3. Fully automated bore hole drilling process

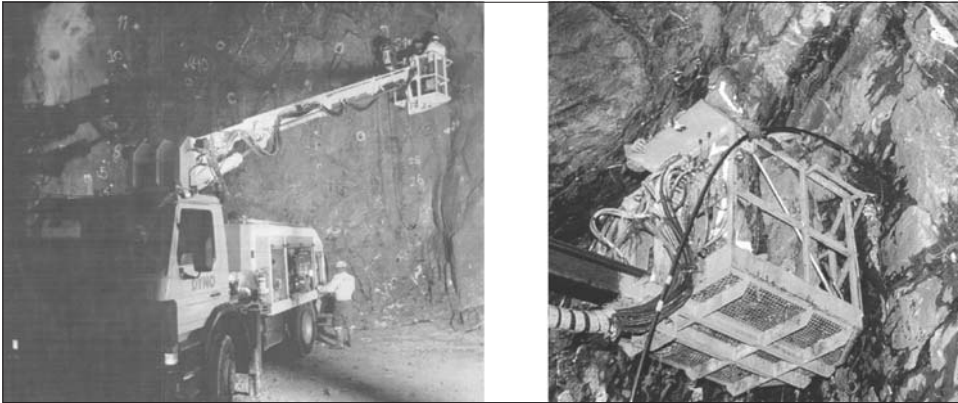


Bild 4. Laden von Emulsionssprengstoffen
Fig. 4. Charging emulsion explosives

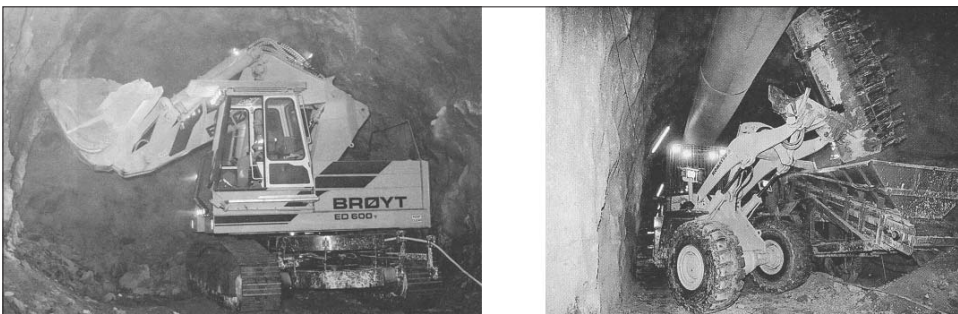


Bild 5. Laden des Ausbruchs: Tunnelbagger mit Hochlöffel; Seitenkipplader
Fig. 5. Loading of muck: Crawler loader with front shovel; Side dumping bucket loader

4.2 Sprengtechnologie

Die Entwicklung in der Sprengtechnik wird hauptsächlich durch drei Faktoren beeinflusst. Dies sind die sichere Handhabung, die Reduzierung der Toxizität und das schnelle, einfache Laden der Bohrlöcher [4].

4.2.1 Sprengstoffe

Es gibt eine breite Palette von Sprengstoffen. Aufgrund der höheren Sicherheit, der geringeren Toxizität und dem beschleunigten Ladevorgang geht der Trend in Richtung pumpbare Emulsionssprengstoffe. Die Ladelanze wird manuell eingeführt. Die baustellensensibilisierten Emulsionssprengstoffe werden mit einem computergesteuerten Pumpfahrzeug geladen (**Bild 4**). Die zwei Emulsionskomponenten werden automatisiert via Funkfernsteuerung (Armdisplay), volumetrisch gesteuert, im Bohrloch gemischt, wodurch sich Füllungsgrad und Brisanz verändern lassen [4].

4.2.2 Zünder

Dem Vorteil des elektrischen Zündsystems durch die Kontrollmöglichkeit des Zündkreises über den Widerstand steht die Einfachheit und Robustheit des pyrotechnischen Schlauchzündsystems gegenüber. Häufig werden diese pyrotechnischen Zünder in Kombination mit elektronischen Zündern im Kranz verwendet. Diese elektronischen Zünder gewährleisten höchste Sicherheit und gleichzeitig eine genaue Zündfolge der einzelnen Zündstufen. Dies ermöglicht eine wesentliche Verbesserung des erschütterungsarmen, profilgenauen Sprengens. Aufgrund der hohen Stückkosten werden die elektronischen Zünder in Kombination mit dem Schlauchzündsystem verwendet. Beim Einsatz der elektronischen Zünder im Kranzbereich wird die hohe Profilgenauigkeit dadurch erreicht, dass durch die zeitgleiche

Zündung ein sauberes Abspalten im Kranz erzeugt wird. Die Kombination verschiedener Zündmittel mit pumpbaren Emulsionssprengstoffen erhöht die Wirtschaftlichkeit des Sprengvortriebs [4].

4.3 Schuttertechnologie

Unter Schuttern wird das Laden, das Brechen und der Abtransport des Haufwerkes in der Wurfzone verstanden. Die Stückigkeit, die Gesteinsfestigkeit sowie die Ausbruchkubatur pro Abschlag sind wichtige Faktoren für die Wahl des Schutterkonzeptes.

Der Abtransport im Tunnel kann mit gleisgebundenen Schutterzügen, Streckenband oder Dumpern erfolgen. Für die Beschickung des Streckenbandes oder der Schutterzüge ist meist ein Brecher an der Übergabestelle erforderlich. Wird mit Dumpern geschuttet, muss ausreichend Platz vorhanden sein, damit ein Radlader/Fahrlader mit großer Ladeschaufel eingesetzt werden kann. Denkbar sind auch Seitenkipplader, die vor allem in kleinen Profilen eingesetzt werden können. Fahrlader lassen sich auf kurze Distanzen oder in extrem engen Verhältnissen als kombiniertes Lade und Transportgerät einsetzen. Universalgeräte sind kombinierte Einheiten, die sowohl eine Ladeeinrichtung als auch eine Übergabebrücke besitzen. Die Tendenz geht in die Richtung von Hochleistungsschutterkonzepten, z.B. durch den Einsatz von speziellen Raupenbaggern mit Hochlöffel (**Bild 5**). Dieser Tunnelbagger ist zurzeit eines der leistungsfähigsten Geräte und kann selbst unter beengten Platzverhältnissen Leistungen bis zu 500 t/h (300 l^m³/h) erreichen [4].

Denkbar sind auch Seitenkipplader, die vor allem in kleinen Profilen eingesetzt werden können. Fahrlader lassen sich auf kurze Distanzen oder in extrem engen Verhältnissen als kombiniertes Lade und Transportgerät einsetzen. Universalgeräte sind kombinierte Einheiten, die sowohl eine Ladeeinrichtung als auch eine Übergabebrücke besitzen. Die Tendenz geht in die Richtung von Hochleistungsschutterkonzepten, z.B. durch den Einsatz von speziellen Raupenbaggern mit Hochlöffel (**Bild 5**). Dieser Tunnelbagger ist zurzeit eines der leistungsfähigsten Geräte und kann selbst unter beengten Platzverhältnissen Leistungen bis zu 500 t/h (300 l^m³/h) erreichen [4].

4.4 Sicherungstechnologie

Die Sicherung erfolgt je nach Profiltyp ein, zwei oder dreistufig im Brust, Vortriebs- und rückwärtigen Bereich. Welcher Bereich baubetrieblich der maßgebende ist, wird vom Sicherungskonzept in den definierten Profiltypen bestimmt. Die Ankerarbeiten (d.h. Bohren, Setzen und Vorspannen) sind weitestgehend halb- bzw. voll automatisiert. Zwei Arten der Ankersicherung müssen unterschieden werden:

- Systemankering - gemeint ist das Installieren von Gebirgsankern entsprechend einem systematisch angeordneten Raster, abhängig von der Felsicherungs-kategorie.
- Lokale Verankerung einzelner Bruchkörper - in diesem Fall werden Felskörper zurück verankert, um ein Herunterfallen und somit die Gefährdung von Arbeitern und Ausrüstung zu verhindern.

Vor Ort müssen der Bauführer und der Vorarbeiter gemäß der Schichtung des Gebirges den Applikationspunkt sowie die Richtung der Anker bestimmen, um die optimale Tragfähigkeit des Ankers voll auszunutzen.

Das Versetzen der Stahlbögen erfolgt meist noch manuell oder mit Baggern als Hilfsgerät. Der neueste Stand der Technik [5] ist jedoch, die Stahlbögen mit Erektor-manipulatoren einzubauen (Bild 6). Diese mechanisierte Einbaumethode dient der Leistungssteigerung. Hier besteht ein großes Potential, welches in der Zukunft gebraucht wird, um den Einbau der temporären Sicherung mittels Stahlbögen kosteneffizienter zu machen.

Der Einbau von Sicherungsnetzen ist relativ zeitaufwendig. Mechanisierte Geräte zum Auslegen der Netze mit kombinierten Verankerungsvorrichtungen werden zurzeit entwickelt und getestet. Die hohe Leistung, die dabei erreicht werden kann, bedingt jedoch weitgehend akkurat gesprengte Querschnitte.

Das Auftragen des Spritzbetons kann entweder manuell oder mit Manipulatoren erfolgen. In Abhängigkeit von der Geometrie des aufgefahrenen Querschnitts und der Betonmenge, die in einer vorgegebenen Zeit aufgetragen werden muss, wird das Nass- oder das Trockenspritzverfahren eingesetzt. Neben der Forschung im materialtechnologischen- und im applikationstechnischen [6] Bereich werden große Anstrengungen unternommen um den Spritzbetonauftrag zu automatisieren [7]. An der Eidgenössischen Technischen Hochschule (ETH) Zürich [8] wurde in Zusammenarbeit mit Master Builder Technologies ein multikinematischer Spritzbetonroboter entwickelt.

In der Praxis werden Manipulatoren oft als Roboter bezeichnet, obwohl sie handgesteuert werden. Das entwickelte Gerät ist ein computergesteuerter Spritzbetonroboter (Bild 7). Der Computer steuert einerseits die mechanischen Kinematikelemente und andererseits den Applikationsprozess. Der computergesteuerte Spritzbetonroboter ist mit einer Laservorrichtung ausgerüstet, welche die Oberfläche des Tunnels, auf die der Spritzbeton aufgetragen werden soll, scannt und in einem Raster abbildet (Bild 7). Der Computer berechnet dann eine virtuelle Bahnführungsoberfläche, basierend auf der gemessenen sphärischen Tunneloberfläche. Die virtuelle Bahnführungsoberfläche befindet sich im Abstand d_{vp} von der Tunneloberfläche. Auf dieser wird die Düse des Spritzbetonroboters jeweils senkrecht zur Gesteinsoberfläche geführt. Dies ermöglicht einen optimalen Auftrag des Spritzbetons mit geringstem Rückprall und der höchsten Oberflächenglätte.

Der Spritzbetonroboter besitzt verschiedene Betriebsmodi: manuell, halbautomatisch und vollautomatisch. Mit ihm ist es möglich, den Spritzbeton über einen bestimmten Bereich in konstanter Dicke von 4 cm bis 30 cm aufzutragen oder die gesprengte Oberfläche bis hin zu einer endgültigen ebenen Oberfläche auszugleichen.

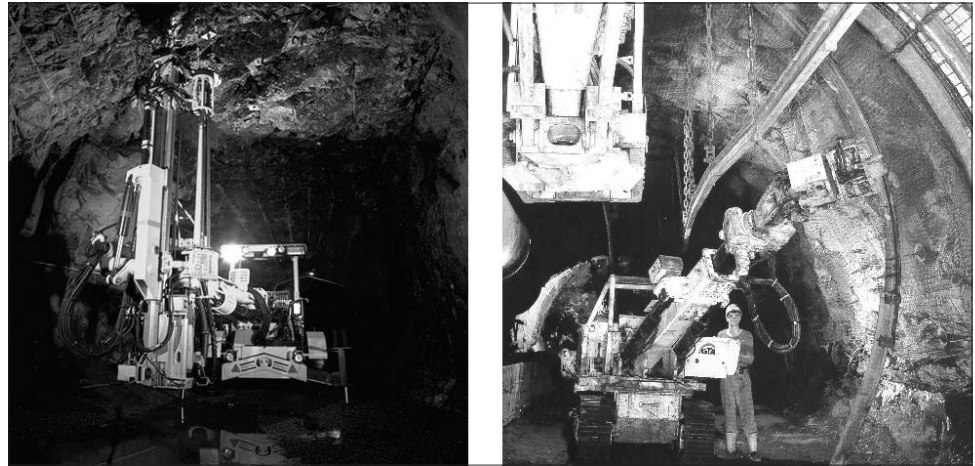


Bild 6. Vollautomatisiertes Ankersetzen und Erektormanipulator zum Einbau der Stahlbögen
Fig. 6. Fully automated bolting and erection manipulator for steel arch placing

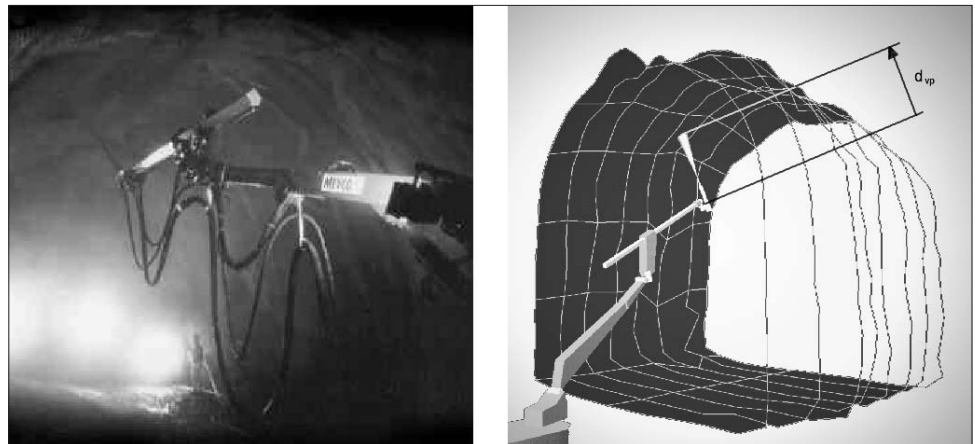


Bild 7. Felssicherung mittels Spritzbetonroboter mit parametrisiertem, gescanntem Arbeitsbereich
Fig. 7. Rock support with shotcrete robot with parameterised, scanned work space

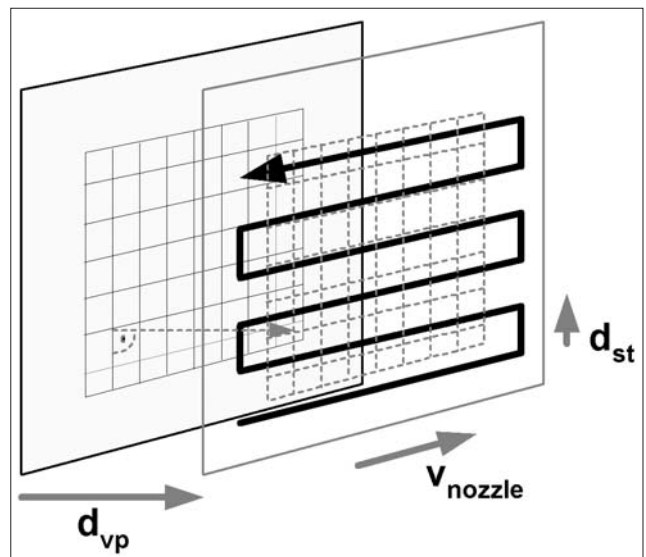


Bild 8. Systematik des Spritzbetonauftrags
Fig. 8. Systematic of shotcrete application

Der Applikationsprozess findet entlang mäandrierender Bahnen (Bild 8) mit der Geschwindigkeit v_{nozzle} statt. Die einzelnen Pfade im Abstand d_{st} , auf denen übereinander gespritzt wird, um die erforderliche Dicke aufzubauen, haben einen Streifenquerschnitt, wie in Bild 9 gezeigt.

Bild 10 zeigt den Ebenheitsgrad der einzelnen Schichtstärken, der sich, infolge des abnehmenden Abstandes d_{st} der Spritzbahnen, mit zunehmender Dicke verbessert.

Diese neueste Entwicklung im vollautomatisierten Spritzbetonauftrag ermöglicht eine hohe Leistung bei gleichzeitiger Erhöhung der Sicherheit für die Arbeiter, da die Bedienung des Geräts außerhalb des Auftragsbereiches stattfinden kann. Ebenfalls im Spritzprozess inbegriffen ist die Qualitätskontrolle bezüglich Schichtstärke, Verdichtung, Rückprall und Homogenität.

Bild 11 zeigt die Eingabe zur Parametrisierung des Spritzbetonroboterprogramms, bei dem man die erforderliche Ebenheit und die Schichtstärke wählen muss. Die Prozesssteuerung berechnet für die gewählten Betriebsdaten automatisch den Spritzbahnabstand und alle weiteren operationalen Parameter sowie den zu erwartenden Rückprall [9]. Das Hochleistungssystem besteht aus Trägerfahrzeug, Manipulatorarm, Betonpumpe und Zusatztanks mit Dosiereinheit, welche direkt vom Fahrmischer oder durch Pumpen-Versorgungsleitungen gefüllt werden. Die Leistung ist abhängig von der Konsistenz des Frischbetons [10]. Die Frühfestigkeit, die in vielen Fällen gefordert wird, kann durch Zugabe von Additiven erreicht werden.

5 Parallelisierungsziele und Lösungsansätze für den rückwärtigen Bereich

Die Ziele der Industrialisierung des rückwärtigen Bereichs des Sprengvortriebs sind:

- Trennung der linearen Transportflüsse
- Trennung der Arbeitsbereiche von den Transportprozessen
- Trennung der Hilfseinrichtungen von den Transportflüssen und Arbeitsbereichen

Weiterhin ist der Transport der einzelnen Infrastrukturelemente wie Container, Hilfsstoffe, Hilfsaggregate und Geräte, die sich im rückwärtigen Bereich befinden und heute meist noch einzeln dem Vortrieb nachgeführt werden, durch gleichzeitigen Umschlag zu vereinfachen. Der Fokus muss ebenfalls auf parallelen Arbeitsabläufen und parallelen Transportflüssen im gleichen Bereich liegen.

Ein Lösungsansatz zur Industrialisierung des rückwärtigen Bereichs des Sprengvortriebs ist eine aufgehängte Trägerplattform. Sie dient als:

- Träger der Hilfsinfrastruktur wie Ladeband, Lüftungskanal und Luttenspeicher für kontinuierliche Verlängerung der Lüftung, Sicherheits-, Sanitär-, Magazin-, Mannschafts- und Bürocontainer sowie Kabel- und Leitungströmmeln für die Verlängerung der Versorgungsleitungen während der Plattformbewegungen
- Brücke über die Parkzone der Vortriebsgeräte

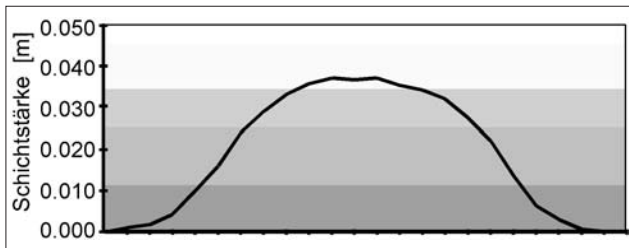


Bild 9. Massgeblicher Querschnitt einer Spritzbetonbahn
Fig. 9. Decisive profile of one shotcrete profil

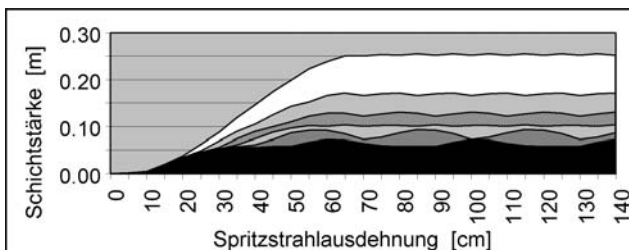


Bild 10. Simulation verschiedener Schichtdicken mit entsprechender Oberflächenglätte
Fig. 10. Simulation of different layer thickness with according smoothness

- Brücke über den Sohlausbaubereich
- Brücke über den Umschlagbereich des Ausbruchmaterials vom Plattformförderband (Ladeband) auf den Schutterzug oder das Streckenband etc. als auch für die Belieferung mit Hilfsmaterial für den Vortrieb und den Sohlausbau

Die Länge der aufgehängten Plattform ist abhängig von:

- Anzahl und Art der Hilfsinfrastruktur auf der Plattform
- Länge der Parkzone für nicht benutzte Vortriebsmaschinen
- Länge des Sohlausbaubereiches
- Länge der Materialumschlagzone, um den Ausbruch auf das Tunnelförderband, auf Lkws oder Züge für den Gleittransport aus dem Tunnel umzuladen

6 Das Nachläufersystem als aufgehängte Plattform

Das aufgehängte Nachläufersystem als Infrastrukturtäger wurde in längeren Tunneln mit kleineren Ausbruchquerschnitten, wie z.B. in einspurigen Bahntunneln (Vereina-Süd oder Mitholz), in der Schweiz

Shotcrete Application

evenness

weighty of time [%]

weighty of rebound [%]

layer thickness [m]

Process Control

Please choose the following adjustment

Path line distance d_{st}	<input type="text" value="0.16"/> [m]	d_{nozzle}	<input type="text" value="1.5"/> [m]
expected rebound	<input type="text" value="11"/> [%]	v_{nozzle}	<input type="text" value="10"/> [cm/s]
		R_{nozzle}	<input type="text" value="2"/> [1/s]

Bild 11. Eingabe-Ausgabe-Maske des Spritzbetonroboters
Fig. 11. Input-Output mask of shotcrete robot

bereits eingesetzt [11]. Durch das aufgehängte Nachläufersystem war es möglich, die Leistung des Sprengvortriebs erheblich zu steigern.

Durch die Verwendung solcher Nachläufer (Bild 12) war es möglich, Arbeitsprozesse parallel ablaufen zu lassen und die Materialflüsse in Versorgung und Entsorgung zu trennen. Die Nachläufer sind verschiebbare Infrastrukturträger, die als Plattform auf aufgehängten Schienen nachgeführt werden (Bild 13). Auf jeder Seite der Plattform sind Vorschubzylinder zusammen mit Arretierbolzen installiert, um die Bühne im Schreitvorgang vorwärts auf den aufgehängten Schienen zu verschieben. Es ist zwingend notwendig, dass die beidseitigen Vorschubzylinder gleichzeitig nachrücken.

Der vordere Bereich der aufgehängten Plattform wird während des Sprengens durch einen Kettenvorhang gegen Felstrümmer geschützt (Bild 14). Vor dem schrägen Zuführungsband ist ein Brecher (Bild 14) angeordnet. Dieser rückt zum Schuttern bis ca. 30 m hinter die Ortsbrust vor.

Weiterhin wird die gesamte Hilfsinfrastruktur - Kabeltrommeln, Umformer, Kompressoren, Notstromaggregate, Sprengstoffcontainer, Container für Mannschaft und Vorarbeiter, Werkstatt, Magazin, Toiletten, Wasserinstallation und Lutten mit Luttenpeicher - auf der aufgehängten Nachläuferplattform mitgezogen. Der Umschlagbereich (Bild 17 bis Bild 19) am Ende der Plattform hat zwei Materialflüsse zu bewältigen. Unter der Plattform muss die Materialversorgung für den temporären Sicherungseinbau und weitere Arbeiten über den Sohlausbaubereich (Bild 17) und die Parkzone transportiert werden. Dies wird mittels Überkopf-Schienenkran realisiert. Der Ausbruch, welcher auf der aufgehängten Plattform (Bild 15) mittels Förderband über Park-, Lager- und Sohlausbaubereich gefördert



Bild 14. Trümmerschutz - Brecher - schräges Zuführungsband [12]
Fig. 14. Rock debris protection - crusher - inclined feeding belt [12]

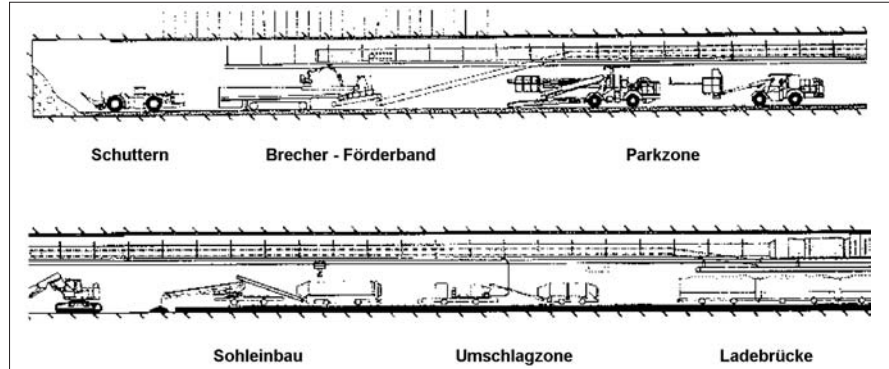


Bild 12. Nachläufersystem - Tunnel Vereina-Süd (Schweiz) [10]
Fig. 12. Back-up system - tunnel Vereina South (Switzerland) [10]

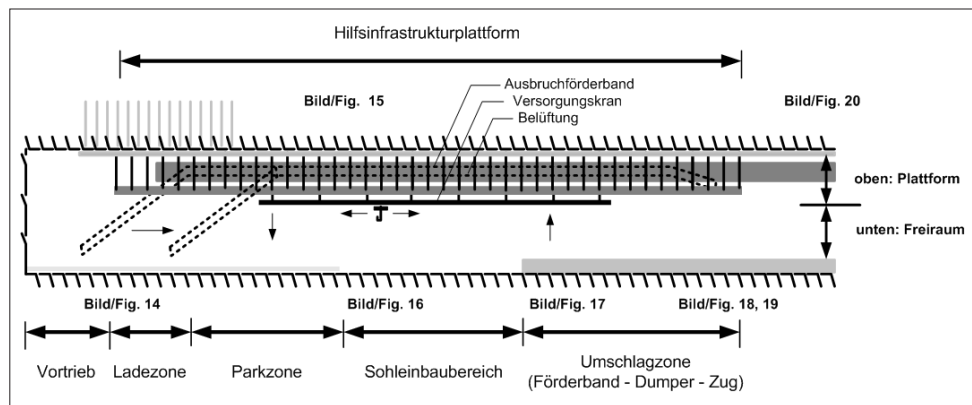


Bild 13. Funktionsbereiche der Nachläufer-Infrastrukturplattform
Fig. 13. Functional areas of back-up infrastructure platform

wird, muss in der Umschlagzone auf das Tunneltransportsystem, z.B. auf den Schutterzug (Bild 18) oder ein Streckenförderband (Bild 19), umgeladen werden.

Infolgedessen kann der Querschnitt unter dem Nachläufer für Tätigkeiten, die zum Sohlausbau erforderlich sind, genutzt werden. Das Ende der noch nicht ganz fertig installierten Plattform mit Luttenpeicher, Container etc. ist in Bild 20 dargestellt.

7 Innovation

Innovationen im konventionellen Vortrieb sind einem Prozess, der Erfahrung und Entwicklung einschließt, unterworfen. Die folgenden laufenden Entwicklungen stehen im Einzelnen in engem Zusammenhang mit der Industrialisierung des Sprengvortriebs:



Bild 15. Auf der aufgehängten Plattform: Förderband, Lutte und Fussweg [12]
Fig. 15. On top of the suspended platform: conveyor belt, air duct and walkway [12]



Bild 16. Unterhalb der aufgehängten Plattform: Sohlausbau und Sohleinbau [12]
Fig. 16. Underneath the suspended platform: base excavation and base construction [12]

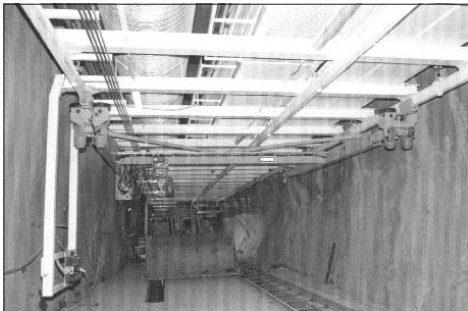


Bild 17. Unterhalb der aufgehängten Plattform: Umschlagbereich mit Kran [12]
Fig. 17. Underneath the suspended platform: handling area with supply crane [12]



Bild 18. Unterhalb der aufgehängten Plattform: Ladezone mit Ausbruchtransfer vom Plattformförderband auf den Schutterzug [12]
Fig. 18. Underneath the suspended platform: loading area with muck transfer from platform conveyor to the muck train [12]

- Roboterisiertes Laden des Sprengstoffs
- Roboterisierung der Spritzbetonapplikation. Die hierzu erforderlichen Geräte sind bereits weitgehend entwickelt [8]. Die Maschine vermisst unabhängig die Tunnelgeometrie, steuert das Senkrechtstehen der Spritzdüse zur Oberfläche in Übereinstimmung mit dem festgelegten Abstand und appliziert den Spritzbeton vollautomatisch in jeder gewünschten Schichtstärke und auf vorbestimmten Bahnen. Auf diesem Weg kann der Rückprall in Querschnitten, die mittels schonendem Sprengen aufgeföhren wurden, auf Werte zwischen 8 und 12 % (Nassspritzverfahren) reduziert werden.
- Neue Verfahren zum Aufbringen von aufgespritzten Wasserabdichtungsmembranen. Der Vorteil der aufgespritzten Membranen gegenüber konventionellen Folienmembransystemen ist die hohe Verbundfestigkeit zwischen den Betonschichten und der Membran. Diese hohe Haftzugfestigkeit erlaubt es, die Schichten praktisch als Verbundstruktur anzusehen, wodurch eine Reduktion der Gesamtschichtstärke möglich ist. Die aufgespritzten Membranen können ohne weiteres in Verbindung mit stahlfaserbewehrtem Beton angewandt werden.
- Stahlfaserbewehrter Spritzbeton führt meist zur Vereinfachung des Arbeitszyklus und zu signifikanter Zeiteinsparung im Vergleich zu Spritzbeton, der mit Netzen bewehrt ist. Stahlfaserbeton und aufgespritzte Abdichtungsmembranen repräsentieren eine passende Kombination für das einschalige Tunnelbausystem. Durch die Nachbearbeitung der Oberflächen, z.B. roboterisiertes Aufbringen



Bild 19. Unterhalb der aufgehängten Plattform: Ladezone mit Ausbruchtransfer vom Plattformförderband auf das Streckenförderband [12]
Fig. 19. Underneath the suspended platform: loading area with muck transfer from platform conveyor to the tunnel conveyor belt [12]

von Mörtel zur Verbesserung der Gleichmäßigkeit der Oberfläche oder durch roboterisiertes Aufbringen feuerfester Überzüge, kann die Struktur nachhaltig geschützt werden.

8 Entwicklungstendenzen beim Hochleistungssprengvortrieb

Auf Basis der positiven Erfahrungen der Projekte Vereina-Süd und Mitholz (Schweiz) werden für Teilabschnitte der NEAT (Neue Eisenbahn-Alpen-Transversale; zwei Tunnel: Gotthard ~57 km, Lötschberg ~35 km) Nachläufersysteme für

den konventionellen Vortrieb weiterentwickelt [12]. Bei dem bestehenden Konzept ist das Beschleunigungspotential auf die Parallelisierung im rückwärtigen Bereich konzentriert. Das Ziel des nächsten Entwicklungsschrittes ist es, speziell die Vortriebszone weiter zu industrialisieren. Dies bedeutet, die verschiedenen Arbeitsschritte so weit wie möglich gleichzeitig auszuführen und die Interaktion zwischen Vortrieb und rückwärtigem Bereich zu optimieren. Diese permanente Entwicklung basiert auf dem Konzept der aufgehängten Plattform, der Verwendung von hochmechanisierten und roboterisierten Maschinen und Geräten sowie der Trennung der Arbeitsprozesse in der Vortriebszone.

Der Ansatz zur Beschleunigung eines Sprengzyklus liegt in der ganzheitlichen Betrachtung aller Arbeiten und deren Optimierung. Das neueste Konzept des industrialisierten Hochleistungssprengvortriebs basiert auf dem Einsatz von zwei ineinander greifenden Nachläufern, der Infrastrukturhängebühne und einer zweiten leichten Schnellläuferbühne. Die vorgestellten, teilautomatisierten Produktionsgeräte werden in das Konzept der neuen Nachläufersysteme integriert, um das volle Effizienzsteigerungspotential zu entfalten. Bis heute haben sich diese Nachläufersysteme in Querschnitten bis zu 70 m² bewährt und zu einer wesentlichen Leistungssteigerung geführt. Es gilt nun, auch das Leistungssteigerungspotential für größere Querschnitte auszuschöpfen. Bei Tunneln mit Ausbruchbreiten von weniger als 7 bis 9 m müssen die Arbeiten Bohren / Laden, Schüttern, Anker setzen / Bogen stellen in Brust und Vortriebsbereich sequentiell ausgeführt werden. Parallel zu diesen Arbeiten kann im rückwärtigen Bereich unter der aufgehängten Plattform die Sohle hergestellt werden. In Tunneln



Bild 20. Rückseite der aufgehängten Plattform: Luftspeicher und Magazincontainer sowie sonstige Hilfsinfrastruktur [12]
Fig. 20. Rear view of the suspended platform: air duct storage and magazine container as well as other support infrastructure [12]

mit Ausbruchbreiten von mehr als 9 bis 10 m können die Arbeitsvorgänge im Brust- und Vortriebsbereich weitgehend parallel ausgeführt werden (Bild 22), d.h. Bohren der Sprenglöcher in der einen Profilhälfte und Setzen der Anker in der an-

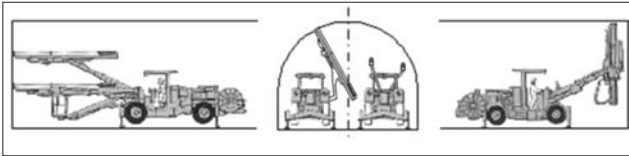


Bild 21. Querschnitt und Seitenansicht von parallelen Vortriebsarbeitsprozessen (Bohren und Anker setzen)

Fig. 21. Cross section and side view of simultaneous heading working process (drilling and bolting)

deren (Bild 21), anschließend Umstellen und gleichzeitig die Bohrlöcher laden und die Zündung vorbereiten. Während des Schütterns und Sicherns kann die Sohle erstellt werden, welche hinter dem rückwärtigen Bereich als Tunneltransportpiste dient.

Neben der Unterscheidung in große und kleine Querschnitte ist aus der Sicht der Optimierung der zeitkritischen Arbeiten eine Gliederung nach Ausbruch und Sicherungsklassen vorzunehmen. Diese haben entscheidenden Einfluss auf die Arbeitsprozesse im Ortsbrustbereich.

8.1 Vortrieb Kategorie 1: standfester nachbrüchiger Fels

In der Kategorie 1 (Ausbruchklasse AK I bis III nach SIA 198 [13]) sind geringe bis erhebliche Sicherungsmaßnahmen in der Ortsbrust und im Tunnelquerschnitt vom Brust-/Vortriebs- bis zum rückwärtigen Bereich einzubauen. Die Infrastrukturhängebühne wird ca. 70 m hinter der Ortsbrust, im First hängend, nachgezogen. Die Schnellläuferbühne ist mit multifunktionalen, hochleistungsfähigen Geräten für das Versetzen von Anker, Bogen und Hängeschienen bestückt und mit einer Lagerfläche für Netze und Ausbaubögen ausgerüstet. Während der Lüftungsphase wird die Schnellläuferplattform (Bild 23) zur Ortsbrust vorgeschoben. Das Profil des gesprengten Abschlags muss für die Profilreinigung frei sein. Die Brustreinigung kann mit einem Bagger mit Hochlöffel optimal erfolgen, gegebenenfalls (Ausbruchquerschnitt > 70 m²) fährt dieser auf das Haufwerk. Im Brust-/Vortriebsbereich werden Anker mit oder ohne Netz vom Schnellnachläufer aus versetzt. Gleichzeitig kann unten das Schüttern mit dem Tunnelbagger oder Lader erfolgen. Nach dem Schüttern wird der Brecher zu-

rückgezogen, mit einem Spritzbetonroboter (Pneuträgerfahrzeug), wenn erforderlich, Spritzbeton appliziert und anschließend wieder mit dem Bohren begonnen. Während der Bohrarbeiten an der Ortsbrust erfolgt im rückwärtigen Bereich die Applikation von Spritzbeton und, wenn erforderlich, einer gespritzten Abdichtung. Der Nachläufer mit den entsprechenden Funktionsbereichen ist in Bild 23 dargestellt.

8.2 Vortrieb Kategorie 2: geringe Standfestigkeit

In dieser Kategorie 2 (Ausbruchklasse AK IV bis V nach SIA 198 [13]) sind im Brust- und Vortriebsbereich massive Sicherungsmaßnahmen in der Ortsbrust und im Querschnitt einzubauen. Der Abbau erfolgt sprengtechnisch in Kurzabschlägen oder mechanisch mit Hydraulikhammer, Schrämmkopf oder Baggerschaufel.

Die Infrastrukturhängebühne wird ca. 50 m hinter der Ortsbrust nachgezogen. Die Schnellläuferbühne (Länge ca. 30 m) wird bis ca. 10 m an die Ortsbrust herangeführt. Falls eine vorausseilende Spießsicherung erforderlich ist, können von dem Schnellläufer aus Spieße in Brust und Kranz vorgetrieben werden. Auf der Schnellläuferbühne erfolgt während der Schutterung die Vormontage der Ausbaubögen und das Vorbereiten der Netze. Bei ausreichend großem Querschnitt kann parallel zum einseitigen Abbau in der anderen Profilhälfte der Stahlbogeneinbau durchgeführt werden. Die Schnellläuferbühne ist mit einem Ankergerät und einem kleinen Spritzbetonmanipulator bestückt, da die Parkzone unter der Bühne für Radfahrzeuge infolge des Sohleinbaus sehr beschränkt ist.

Bei der Durchörterung von geologisch stark wechselnden Zonen wie dem Tavetscher Zwischenmassiv (Schweiz) ist, infolge äußerst komplexer Geologie, der fließende Übergang zwischen sprengtechnischem und mechanischem Abbau erforderlich. Durch das Konzept des Hochleistungssprengvortriebs mit zwei Hängebühnen kann die größtmögliche Vortriebsleistung erreicht werden. Die Schnellläuferbühne muss „lediglich“ auf beide Vortriebskategorien zugleich ausgelegt sein. Durch die Einhaltung dieser Forderung kann trotz der oder gerade durch die Industrialisierung des Sprengvortriebs die Flexibilität dieser Vortriebsmethode gewahrt werden.

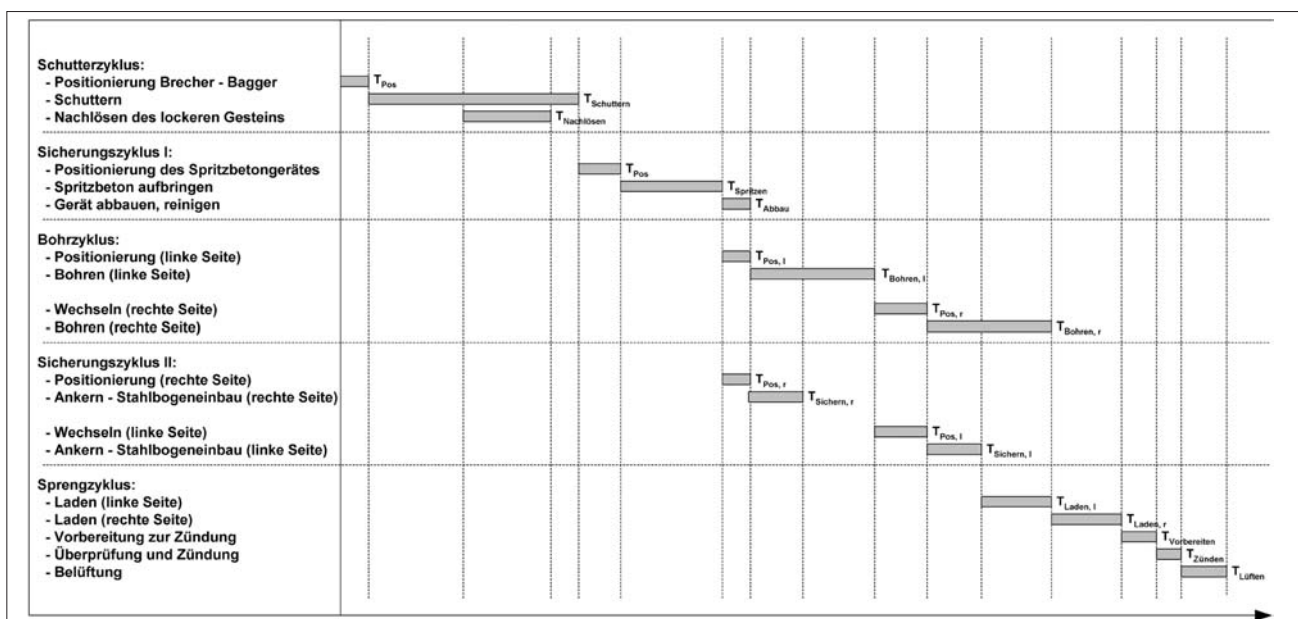


Bild 22. Zyklusplan des Sprengvortriebs (Vortriebszone) in Tunneln mit einer Breite grösser 9 m

Fig. 22. Cycle schedule of drill and blast excavation (head area) in tunnels with a width in excess 9 meters

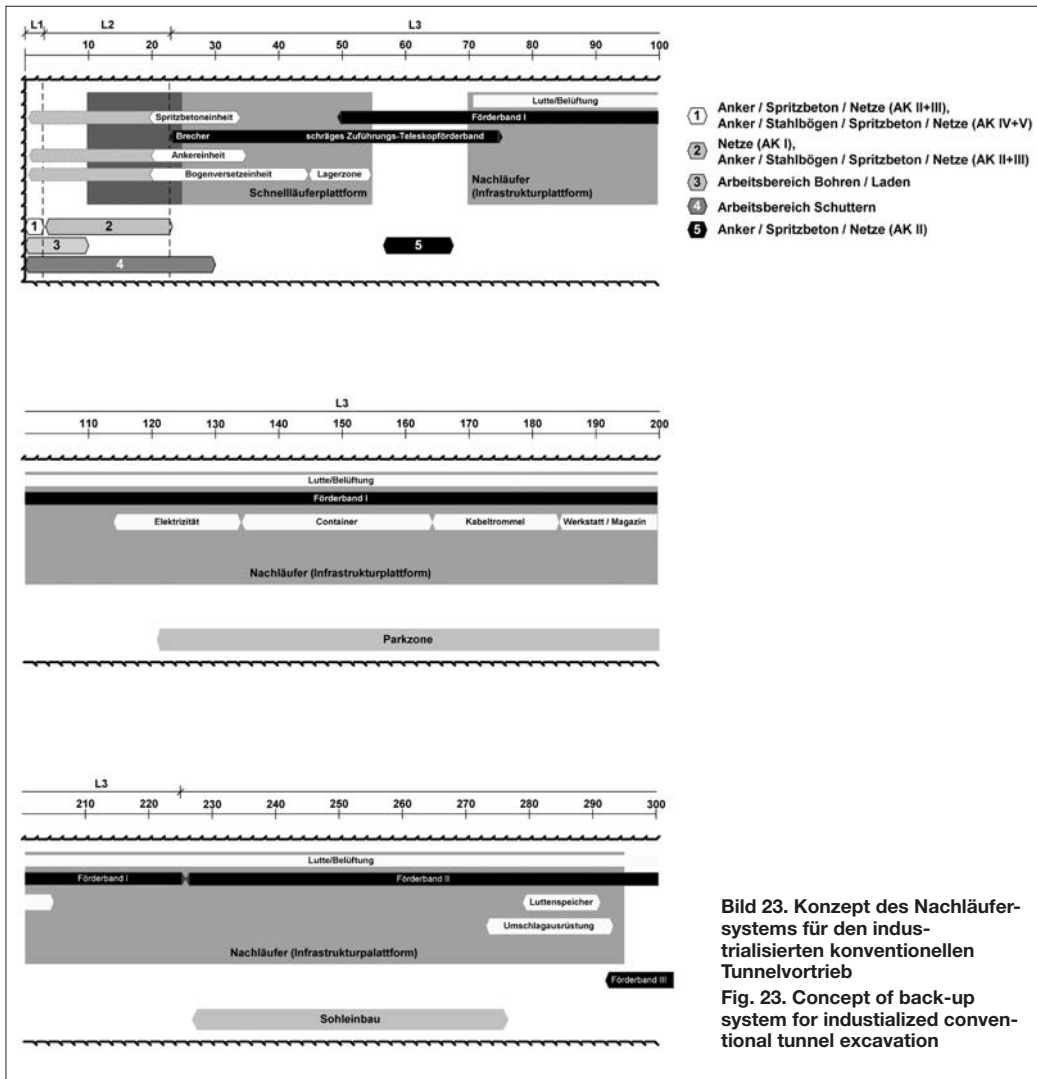


Bild 23. Konzept des Nachläufer-systems für den industrialisierten konventionellen Tunnelvortrieb
Fig. 23. Concept of back-up system for industrialized conventional tunnel excavation

9 Zusammenfassung und Ausblick

Die folgenden Vorteile gegenüber dem traditionellen handwerklichen Sprengvortrieb wurden bereits erreicht:

- Die Leistung wurde durch zyklische Hochleistungsgeräte und -maschinen sowie die aufgehängte Plattform um ca. 30 % gesteigert.
- Die Gesamtarbeitsstunden in der Vortriebszone konnten um gleichfalls 30 % reduziert werden.
- Die gesamte Kosteneffizienz wurde verbessert.
- Durch Trennung der Transportprozesse von den Arbeits- und Maschineneinsatzbereichen erhöhte sich die Sicherheit.
- Ebenso wurden Fortschritte bei der Humanisierung der Arbeit erreicht.

Die folgenden Probleme sind dennoch zu bewältigen:

- Arbeiter und Führungskräfte müssen die Industrialisierung der vorher manuell dominierten Arbeit mental akzeptieren.
- Der Ausbildungsstandard der Arbeitskräfte muss durch adäquate Weiterbildungsmaßnahmen verbessert werden, da höher qualifizierte Arbeiter nötig sind, um mit den hoch entwickelten Maschinen, die für die zyklischen Tätigkeiten eingesetzt werden, umgehen und die Nachläufer als Logistiksysteme nutzen zu können. Dies ermög-

licht die flexible und optimale Nutzung der Mechanisierung und Parallelisierung der Prozesse.

Die richtigen Schritte zur Industrialisierung des Sprengvortriebs wurden durch innovative, spezialisierte und teilweise automatisierte, computergestützte Ausrüstung sowie den Einsatz der Hängeplattform, welche die Trennung von simultanen Prozessen ermöglicht, eingeleitet. Jedoch muss von den folgenden Potentialen der Industrialisierung ebenfalls Gebrauch gemacht werden: Die Leistung des Schütterns muss erhöht werden; heute liegen die Leistungen bei etwa 300 m³ pro Stunde, sie sollten auf 500 m³ je Stunde erhöht werden. Weiterhin sind die Leistungen zum Installieren der Felssicherung zu verbessern und zu beschleunigen, vor allem beim Stahlbogeneinbau und Gewölbebau. Die simultanen Tätigkeiten im Vortriebs- und rückwärtigen Bereich sind ebenfalls zu steigern.

Auf diese Weise wird klar, dass in Zukunft eine größere Flexibilität in der Submissionsphase gefordert ist, damit die verantwortlichen Unternehmen die Stützmittel (Bögen, Anker, Netze etc.) durch weitgehend flexible Auswahl interaktiv mit den Möglichkeiten und der Gestaltung des Nachläufers koordinieren können. Offene Teamarbeit zwischen den planenden Ingenieuren und den verantwortlichen Unternehmen ermöglicht optimale technische und wirtschaftliche Lösungen.

Literatur

- [1] *Tarkoy, P.J.*: Comparing TBMs with drill+blast excavation. Tunnel & Tunneling, October (1995), S. 41 - 44.
- [2] *Maidl, B.*: Tunnelbau im Sprengvortrieb. Berlin: Springer 1997.
- [3] *Girmscheid, G.*: Rationalisierung und Kosteneffizienz beim Sprengvortrieb durch Teil-Roboterisierung und Innovationen. Sonderdruck anlässlich des 40jährigen Firmenjubiläums 1997. MEYCO Equipment, MBT (Schweiz) AG, Winterthur (Schweiz).
- [4] *Girmscheid, G.*: Baubetrieb und Bauverfahren im Tunnelbau. Berlin: Ernst & Sohn 2000.
- [5] *GTA Maschinensysteme GmbH*, Hamminkeln (Deutschland): Technische Unterlagen.
- [6] *Maidl, B.*: Handbuch für Spritzbeton. Berlin: Ernst & Sohn 1992.
- [7] *Siaken, G.*: Die Automatisierung der Düsenführung zur Auftragung von Spritzbeton. Diss. Bochum, 1996.
- [8] *Girmscheid, G.; Moser, S.*: Roboterierte Felssicherung mit Spritzbeton - Entwicklung der Prozesssteuerung des vollautomatischen Applikationsprozesses. Bauingenieur 76 (2001), Nr. 3, S. 135 - 145.
- [9] *Girmscheid, G.; Moser, S.*: Fully automated Shotcrete Robot for Rock Support. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering Magazine Vol. 16 (2001), Nr. 3, S. 200 - 215.
- [10] *Aldrian, W.; Melbye, T.; Dimmock, R.*: Wet Sprayed Concrete - Achievements and Further Work (Nassspritzbeton - bisherige und zukünftige Arbeiten). Felsbau 18 (2000), Nr. 6, S. 16 - 23.
- [11] *Teuscher, P.*: Hochleistungs-sprengvortrieb. Tunnel (2000) Nr. 8, S. 55 - 56.
- [12] *ROWA Engineering AG*, Wangen SZ (Schweiz): Technische Unterlagen.
- [13] *SIA 198*: Untertagebau: Angaben zum Projekt, Ausführung, Besondere Bestimmungen, Ausmaß und Vergütung. 1993.

TECHNISCHER BERICHT

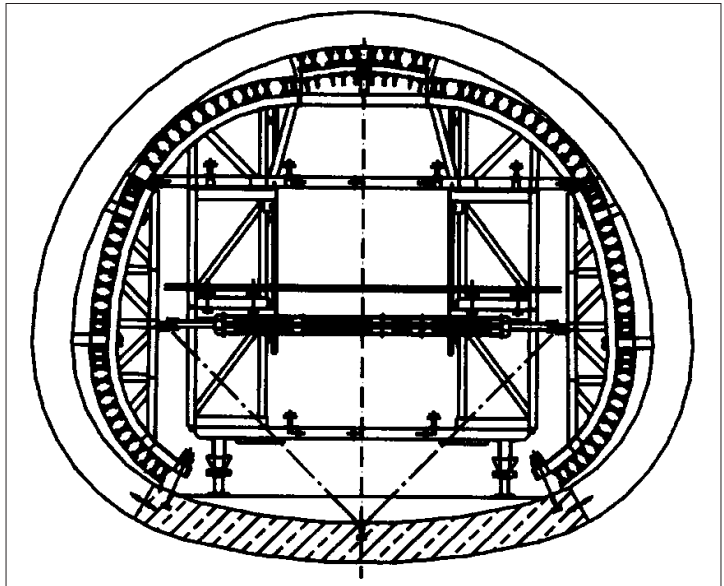
Drei Querschnitte – nur eine Schalung

„Drei verschiedene Querschnitte bei einem U-Bahntunnel in Wien mit einem Schalwagen herzustellen“, so lautete die Aufgabe. Die Arge STRABAG, Porr-ASDAG Tunnelbau GmbH entschied sich für die von MEVA Schalungs-Systeme angebotene Lösung.

Die Länge des Tunnels beträgt 150,74 m. Sie gliedert sich in drei Abschnitte mit 67,76 m, 73,92 m und 9,06 m. Der Querschnitt ändert sich dabei von 6,23 m auf 6,93 m und 7,63 m. Diese Vorgaben machten den Einsatz eines herkömmlichen Schalwagens unwirtschaftlich.

Das Schalungskonzept sah den Einsatz eines projektbezogenen Tunnelschalwagens mit einer Länge von 6,25 m vor. Dadurch ergaben sich im ersten Abschnitt elf Betoniertakte mit 6,16 m, im zweiten Teil zwölf Takte, ebenfalls mit 6,16 m und im Dritten zwei Takte mit 4,53 m. Die Wirtschaftlichkeit des Einsatzes liegt im Anteil der mietbaren Systemteile, der ca. 60 % ausmacht. Die Sonderteile konnten auf ca. 40 % begrenzt werden.

Die Schalungskonstruktion war dabei wie folgt aufgebaut: Auf dem linken und rechten Fahrträger liegt jeweils ein Querträger. Darauf sind je zwei Verlängerungen 150 aus dem Stützbock-Programm montiert. Sie tragen den jeweiligen Gewölbegitterträger. Die beiden Seitengitterträger sind in der Sohle verankert. Belegt ist die Tragkonstruktion mit H 20-Trägern und Mehrschichtenplatten. Eine zusätzliche Queraussteifung erfolgt mit Dreigurtstützen Triplex SB. Der Stirnbügel STB sorgt für eine schnelle, weil systematische Stirnabschaltung.



Diese zweigeteilte Konstruktion ermöglicht die Anpassung an die abweichenden Tunnelquerschnitte durch Einfügen eines jeweils 70 cm breiten Zwischenstückes in der Schalungs- und Tragkonstruktion. Das Betonieren erfolgte durch Anschlussstützen mit Handsperrschiebern DN 125.

[Quelle: Schalungsdruck, Ausgabe April 2002, www.meva.de]
V. Stein, Bochum