

Tunnelbau im Sprengvortrieb – Rationalisierung durch Teilroboterisierung und Innovationen

Der Tunnelbau mittels Sprengvortrieb kombiniert ingenieurgeologische und konstruktive Konzepte mit handwerklichen Arbeitsmethoden. Trotz hoher Mechanisierung sind die Rationalisierungspotentiale bei weitem nicht ausgeschöpft. Zur Weiterentwicklung der Leistungssteigerung und der Kosteneffizienz dieser Vortriebsmethode und zur Erhöhung der Arbeitssicherheit ist es erforderlich, die einzelnen baubetrieblichen Systeme der Arbeitsprozeßkette hinsichtlich Effizienzsteigerung näher zu untersuchen. Es werden mögliche Innovationen im Rahmen der Sprengtechnik und der Teilroboterisierung der Betriebssysteme aufgezeigt, die in Zukunft weiterentwickelt werden sollten. In diesem Beitrag wird der ganzheitliche Zusammenhang zwischen gewählter Konstruktion, Sicherungssystemen und dem rationellen Einsatz von teilroboterisierten Systemen veranschaulicht dargestellt.

Drill and blast method tunneling – Performance efficiency by innovations and use of robots. *Drill and blast method and shotcrete lining tunneling combines engineer geological and structural concepts with craft men methods. Up-to-date the rationalization potentials have not yet been utilized in spite of high mechanization of processes of work in sequence. For further potential development of increased performance and cost efficiency and to improve work safety further innovations regarding blasting techniques and robot machines as well as part systems of the tunneling process chain are urgently needed. In this paper the possible robot process-systems will be identified. Further it underlines the importance of a collective, interactive relation between structural design, protective measurements for the temporary and permanent stability of the tunnel and the consequences of the efficiency for the robot equipment put into operation.*

1 Einleitung

Heute erfolgen bergmännische Tunnelvortriebe meist im TBM- und Schildmaschinen-Vortrieb sowie in Spritzbetonbauweise. Der Rationalisierungsprozeß bei den Tunnelbohr- und Tunnelvortriebsmaschinen durch Mechanisierung, Automatisierung und Roboterisierung ist ungebremst. Bei jedem Projekt verbessern die Maschinenhersteller auf der Grundlage der Erfahrungen der Baufirmen ihre Systeme. Für einen maschinellen TBM- oder SM-Vortrieb mit vorge-

fertigten Tübbinggen ist eine Adaption an veränderte Gegebenheiten während des Bauablaufs kaum mehr möglich. Hier muß die Ausführungsplanung für das Maschinen- und Tübbingkonzept [1] verbindlich und äußerst gründlich durchgeführt werden. Voraussetzung ist jedoch, daß ausreichend interpretierbare Bodenaufschlüsse ein Bodenmodell [2] ergeben, aufgrund dessen eine robuste Vollschnittmaschine entwickelt werden kann. Daher können nach der Lernphase der Mannschaft relativ konstante Leistungen gefahren werden. Das Maschinen- und Tübbingkonzept sollte dann in der Variationsbreite der anstehenden Böden diese Bodenschichten effizient abbauen können. Die einzelnen Elemente einer TBM- oder SM-Vortriebmaschine, bestehend aus der Schildmaschine, dem Nachläufer, dem Materialtransport, etc., werden im System optimiert, um mögliche Schwachstellen innerhalb der Linienbaustelle zu beheben. Das kritische Glied in der Kette entscheidet über die Leistung des gesamten Vortriebs.

Diese sequentielle Betrachtungsweise gilt für den Sprengvortrieb in Spritzbetonbauweise in gleicher Weise. Bei der Spritzbetonbauweise werden ingenieurgeologische Konzepte mit handwerklichen Arbeitsmethoden kombiniert. Der Sprengvortrieb mittels Spritzbeton, Anker und Ausbaubögen ist sehr adaptiv. Dadurch ist der Bauablauf und somit die Vortriebsleistung stärkeren Schwankungen unterworfen als z. B. beim Vortrieb mittels Schildmaschine in einem geschlossenen System mit Tübbingauskleidung. Um optimale Vortriebsleistungen und Kosteneffizienz zu erreichen, müssen die baubetrieblichen Phasenelemente

- Bohren
- Laden und Sprengen
- Reinigen der Ortsbrust
- Sichern

- Schüttern
- Transportieren

effizient aufeinander abgestimmt werden. Trotz der Einzelemente bezüglich Gerätegruppen, Arbeits-takte, etc. ist es für die Effizienz des Vortriebs von entscheidender Bedeutung, daß die einzelnen Elemente als ganzheitliches Herstellungssystem hinsichtlich der möglichen variablen Gebirgsbedingungen systematisch aufeinander abgestimmt werden. Die Spritzbetonbauweise bedarf weiterer Rationalisierungsanstrengungen, um auch weiterhin bei großen Tunnelprojekten gegenüber dem maschinellen Vortrieb, z. B. mittels Tübbingauskleidung, konkurrenzfähig zu bleiben. Daher müssen die Anstrengungen fortgesetzt werden, um diese traditionell handwerkliche Methode weiter durch industrialisierte Lösungen kosteneffizienter zu gestalten. Durch den Liniencharakter sind Tunnelbaustellen sehr geeignet hinsichtlich der flexiblen Teilroboterisierung der ineinandergreifenden, aufeinander abgestimmten Einzelkomponenten der baubetrieblichen Prozeßkette.

Zur Steigerung von

- Kosteneffizienz
- Qualität u. a. durch Vergleichmäßigung
- Leistung
- Arbeitssicherheit und -bedingungen

ist es für einen Hochleistungs-Sprengvortrieb unabdingbar, nicht nur die Einzelemente der Bauprozeßkette zu optimieren durch verbesserte Mechanisierung, Automatisierung und Roboterisierung, sondern alle Systemkomponenten.

Um diese aufeinander abgestimmten Komponenten der baubetrieblichen Herstellungsprozeßkette effizient zu nutzen, ist das Planungskonzept hinsichtlich Querschnitt und Konstruktionsaufbau auf die Automatisierung abzustimmen.

Daher werden die Fortschritte in bezug auf Qualitäts- und Leistungssteigerung im Rahmen des Sprengvortriebs exemplarisch an den Linienelementen des Bauprozesses erläutert:

- Prozeßsteuerung in der Bohrtechnik
- Entwicklungen in der Sprengtechnik
- Verbesserungen in der Schuttertechnik
- Automatisierung bei der Felsicherung
- Anforderung an die Ausbildung.

2 Bohrtechnik

2.1 Entwicklung der Bohrtechnik

Die Technik des Bohrens und damit die Bohrgeschwindigkeit ist in der letzten Jahren wesentlich ver-

bessert worden. Die Bohrzeit ist der entscheidende Zeitfaktor für den Vortrieb mittels Sprengstoffen. Während sich in der Vergangenheit das Sprengen ausschließlich nach den Möglichkeiten der Bohrtechnik richten mußte, ist es heute weitgehend möglich, die Bohrvorgänge den sprengtechnischen Anforderungen anzupassen (Bild 1).

In den letzten 20 Jahren wurden folgende wesentliche Entwicklungssprünge gemacht:

Entwicklung und Einführung von Hydraulikhämmern

- 50 % höhere Bohrleistungen gegenüber den pneumatischen Hämmern
- verminderter Energieverbrauch
- erheblich geringerer Schallpegel.

Entwicklung und Einsatz der Mikroelektronik zur Steuerung von

- Schlagleistung
- Andruck/Rotation/Schlagwerk
- Vorschub
- Spülung.

Dies führte zur Verbesserung der Betriebssicherheit der Geräte sowie zur Erhöhung der konstanten mittleren Leistung und folglich auch zur wesentlichen Schonung der Bohrkronen und des Bohrstahts.

Teilroboterisierung der Bewegungsabläufe

- computergesteuerte Positionsbestimmung
- computer-optimierte Ansteuerung der Bohrlochansatzpunkte aller Bohrarme
- Anti-Festbohrersicherungssensoren etc.

Dies führte zu einer weiteren Verbesserung der mittleren Durchschnittsleistung durch Optimierung der Betriebsabläufe, Erhöhung der Betriebssicherheit durch Schonung der Maschine sowie Reduzierung von Störfällen.

2.2 Bohrmaschinen

Heute sind praktisch nur noch Drehschlagbohrmaschinen im Einsatz, wobei auch die Drehzahl unabhängig von der Schlagzahl variiert werden kann. Es sind weitestgehend elektrisch betriebene ölhydraulische Hämmer im Einsatz. Die Vorteile der ölhydraulischen Bohrhämmer sind

- bessere Energieausnutzung
- stufenloser Übergang zwischen schlagendem und drehendem Bohren
- bessere Anpassung an wechselnde Gebirgsverhältnisse
- Verminderung der Lärm- und Schmutzbelastung.

2.3 Teilroboterisierung der Bohrtechnik mittels Elektronik und Computerunterstützung

Genaueres Bohren ist eine wesentliche Voraussetzung für ein gutes Sprengergebnis. Neben der Entwicklung hochleistungsfähiger Bohrhämmer gewinnt die Frage der exakten und kontrollierbaren Steuerung des Bohrarmes immer größere Bedeutung. Die Mikroelek-

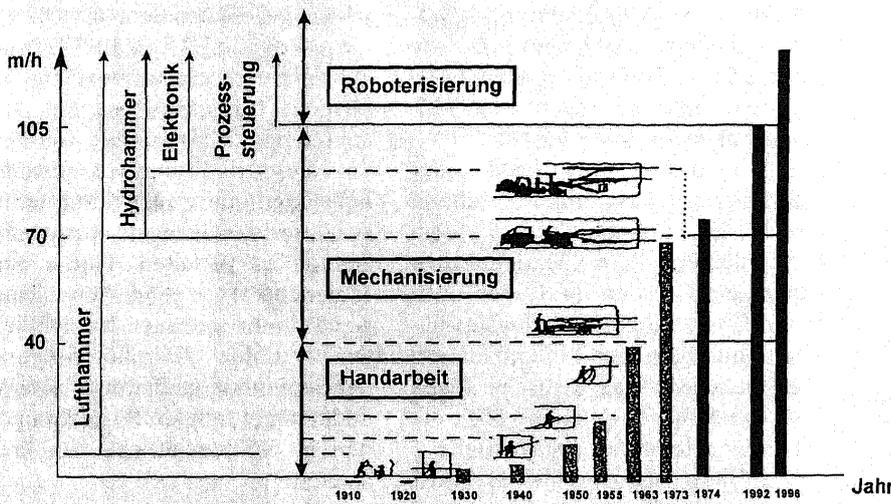


Bild 1. Entwicklungen in der Bohrtechnik
Fig. 1. Developments of drill techniques

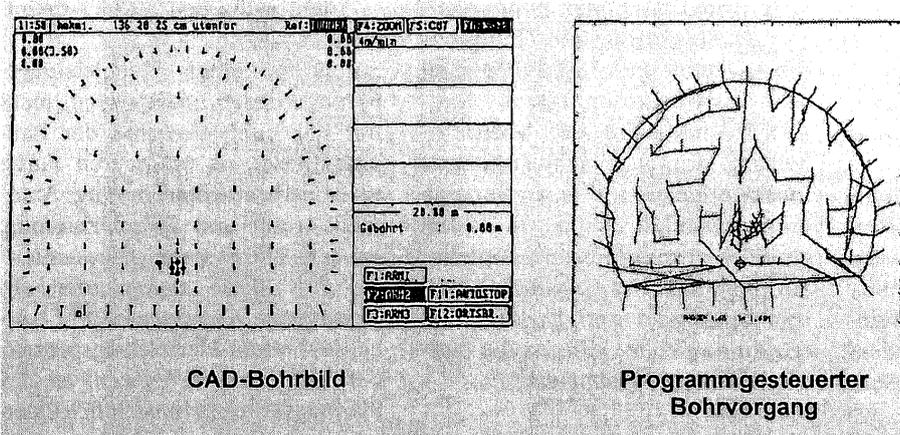


Bild 2. Teilroboterisierung von Bohrwagen [3]
Fig. 2. Computer aided drilling machines [3]

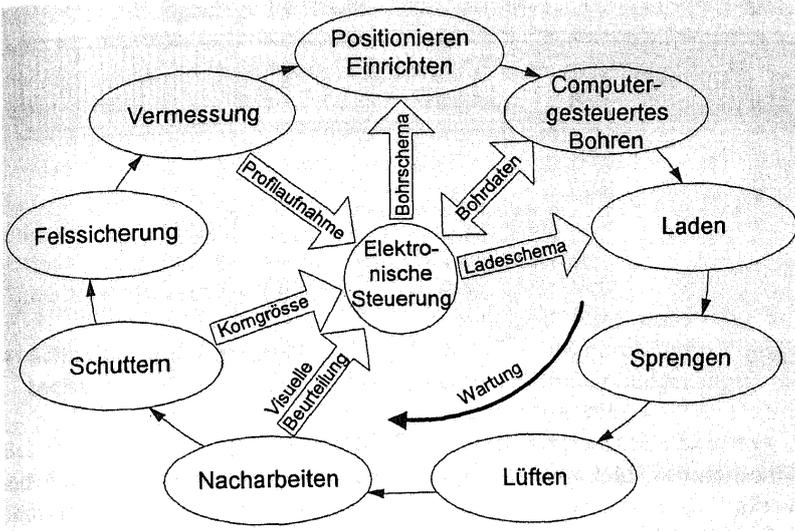


Bild 3. Interaktion des computergesteuerten Bohrens und des Sprengvortriebszyklus
 Fig. 3. Interaction of computer aided drilling and drill and blast method cycles

tronik in Verbindung mit moderner Computertechnik macht es möglich, hervorragende mittlere Taktzeiten (gesamter Bohrvorgang), Bohrleistungen, Bohrqualität und Standzeiten (Nutzungsdauer) von Bohrwerkzeugen zu erreichen.

Die modernen hydraulischen Jumbos sind mit elektronischer Systemsteuerung ausgerüstet. Bei diesen **programmgesteuerten Systemen** [3] läßt sich mittels Steuercomputer, bedingt durch die kurze Reaktionszeit von Sensoren und Elektronik, eine aktive Leistungskontrolle und Steuerung durchführen.

Ferner läßt sich durch die Teilroboterisierung das, auf CAD-Basis erstellte Bohrbild (Bild 2) in den Steuercomputer einlesen. Durch z. B. lasergesteuerte Positionierung wird die Bohrwagenposition zur Tunnelachse bzw. Ortsbrust bestimmt. Die Bohrrarme und Lafetten lassen sich nun durch ihre dreidimensionale Kinematik programmgesteuert zu den virtuellen Bohransatzpunkten der Löcher führen (brauchen nicht mehr angezeichnet zu werden).

Die Bohrlafetten steuern nach optimierten, numerisch bestimmten Wegen (kürzester Gesamtweg) die Bohransatzpunkte bei Multi-bohrarmsystemen (Bild 2) kollisionsfrei an. Dadurch lassen sich

hohe Bruttobohrleistungen und hohe Bohrgenauigkeiten erzielen und somit gute Sprengergebnisse. Die Interaktion zwischen computergestütztem Bohren und Vortriebszyklus ist aus Bild 3 ersichtlich.

Die Elektronik muß besonders robust sein, um unter extrem hartem Betrieb (Stoß, Erschütterung, Detonationswellen etc.) unter Tage sicher zu arbeiten. Der Nachteil der Robotisierung entsteht beim Ausfall oder bei Störung der Elektronik. Dann steht das Gerät und die davon abhängigen Betriebszyklen. Daher sollte neben dem computergesteuerten und programmierten Betrieb stets auch der manuelle Betrieb möglich sein.

3 Entwicklungen in der Sprengtechnik

3.1 Sprengstoffe

Eine Vielzahl von Faktoren beeinflussen die Entscheidung für den projektspezifischen Einsatz der Sprengstoffe. Die wichtigsten Kriterien sind die Geologie und der Querschnitt. Faktoren, welche die Umwelt betreffen, wie Spengerschütterung, Lärm und Gewässerschutz, beeinflussen die Wahl des richtigen Sprengstoffes [4] immer stärker. Gelatinöse Sprengstoffe haben die höchste Energiedichte. Dies ist gerade im Bohrloch Tiefsten, wo die Verspannung des Ge-

birges am höchsten ist, ein großer Vorteil. Mit gelatinösen Sprengstoffen kann man in ein Bohrloch 20 % mehr wirksame Sprengstoffe laden als bei Emulsionen. Bei Emulsionssprengstoffen müssen mindestens 10 % mehr Bohrlöcher gebohrt werden.

Bei **langen Verkehrstunneln** wird man während der Bauphase der Belastung der Tunnel Luft durch Dieselabgase, Schwebeteilchen und giftige Sprengstoffschwaden noch stärkere Beachtung beimessen. Die Emulsionssprengstoffe bieten für diese Aufgaben folgende Vorteile:

- Sie weisen sicherheitstechnische Kenndaten von ANC-Sprengstoffen auf.
- Die toxische Bestandteile (No_x und Co), sind wesentlich geringer als bei gelatinösen Sprengstoffen.
- Sie sind pumpbar oder patroniert.
- Sie haben jedoch meist eine geringere Leistungsfähigkeit als gelatinöse Sprengstoffe.

Beim Einsatz von Emulsionssprengstoffen läßt sich die Lüftungszeit verringern, und das Schüttern kann früher begonnen werden. Dies ist natürlich gegenüber den verlängerten Bohrzeiten und -metern bezüglich der Kosten abzuwägen.

3.2 Zündmittel

Der Erfolg der Sprengung hängt u. a. wesentlich von der Genauigkeit des Zündzeitpunktes und der Zuverlässigkeit des eingesetzten Zündmittels ab.

Die neueste Entwicklung sind **elektronische Zünder** (Bild 4). Beim elektronischen Zünder sind die pyrotechnischen Verzögerungselemente durch einen Microchip ersetzt worden. Jeder Zünder hat einen Kondensator zur eigenen Stromversorgung der Microelektronik und der Zündpille. Diese Möglichkeit eröffnet nun Genauigkeit mit Intervallen in 1-ms-Bereich. Diese Zünder sind durch ein spezielles Programmier- und Steuergerät sicherheitstechnisch gegen Mißbrauch gesichert. Das System muß durch ein kodierte Signal des Steuergerätes entschert werden. Dann erfolgt das Aufladen der Kondensatoren der Zünder einzeln; danach erfolgt die Program-

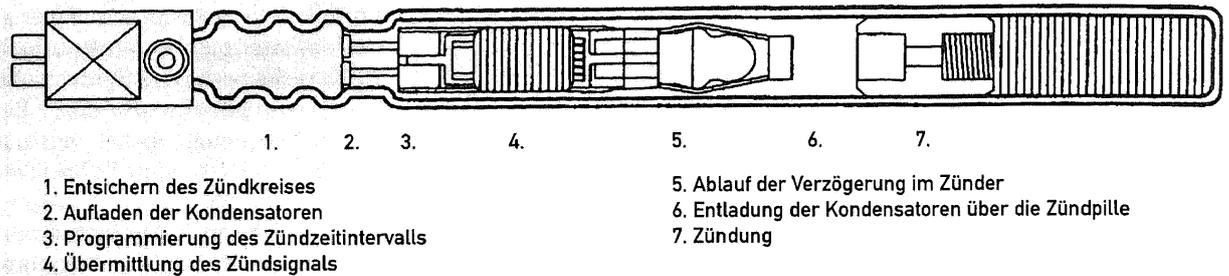


Bild 4. Elektronischer Zünder [4]
 Fig. 4. Electronic detonator [4]

mierung der Zündintervalle auch einzeln. Erst dann erfolgt nach Prüfung die Zündung.

Mittels elektronischer Zeitintervall-Steuerung lassen sich beste Ergebnisse erreichen für

- Haufwerkszerkleinerung
- Reduzierung der Erschütterung
- Profilgenauigkeit.

Die wesentlichen Vorteile der elektronischen Zünder sind

- sechzig Zeitstufen
- Die Zeitstufen sind programmierbar in Millisekunden-Intervallen.
- Null bis hundert Millisekunden können an der Zündmaschine eingestellt werden.
- Die Zündgenauigkeit liegt bei einer Tausendstel-Sekunde.

Wenn folgende Faktoren von Bedeutung sind, bieten elektronische Zünder trotz ihrer hohen Kosten (20 DM/Stück) deutliche Vorteile bezüglich

- Profilgenauigkeit

- bestimmter Stückigkeit des Haufwerks
- Geologie.

Aus Kostengründen kann man zur Erreichung einer großen Profilgenauigkeit die elektronischen Zünder auf die Profillöcher beschränken (Bild 5). Da der Einsatz elektronischer und elektrischer Zünder im gleichen Abschlag nicht erlaubt ist, müßte man die Einbruch- und Helferlöcher mit nichtelektrischen Zündern sprengen. Die Anzündschläuche der Zünder werden untereinander mit einer Knallzündschnur verbunden. Die Knallzündschnur kann mit einem elektronischen Momentenzünder gezündet werden. Durch die elektronischen Zünder lassen sich pro Zündstufe die Lademengen reduzieren. Dadurch kommt es zu einem profilgenauen und erschütterungsärmeren Sprengen.

Beim schonenden Sprengen werden die Erschütterungen vor

allem auf den Ausbruchraum beschränkt. Die wichtigsten Vorteile sind:

- Profilgenauigkeit, dadurch geringerer Mehrverbrauch an Beton und Spritzbeton
- Verringerung der Ladezeiten und Förderkosten
- Gebirgsschonung, dadurch höhere Standfestigkeit der Gebirges, geringere Kosten für die Felsicherung und Verminderung der Unfallgefahr
- Anpassungsfähigkeit bei wechselnden Gebirgsverhältnissen.

Durch Einsatz von präzise arbeitender, computerunterstützter Bohrtechnik und elektronischen Zündern lassen sich die Kosten für das Überprofil senken durch Reduzierung des Ausgleichsbetons oder -spritzbetons. Im Fensterstollen Mitholz [5] konnte das Überprofil von 25 auf 10 cm gesenkt werden.

Die Sprengtechnik bildet mit der Bohrtechnik ein System. Innovationen einer Systemkomponente alleine verbessern das Ergebnis noch nicht wesentlich hinsichtlich der Kosteneffizienz. Daher führten erst die Anstrengungen bei beiden Systemkomponenten zu kostenreduzierenden Verbesserungen.

Das Laden der Bohrlöcher nimmt noch immer zu viel Zeit in Anspruch. Dieser Arbeitsgang muß als nächstes mechanisiert werden. Möglicherweise liegt die Zukunft in der Weiterentwicklung pumpbarer Zweikomponenten-Sprengstoffe. Diese könnten mittels Lanze in das Bohrloch appliziert werden. Beim Zusammentreffen der Komponenten müßten die Stoffe sofort gelieren. Erst dann ergeben die Komponenten einen Sprengstoff. Die Lanze müßte mit einer aufblas-

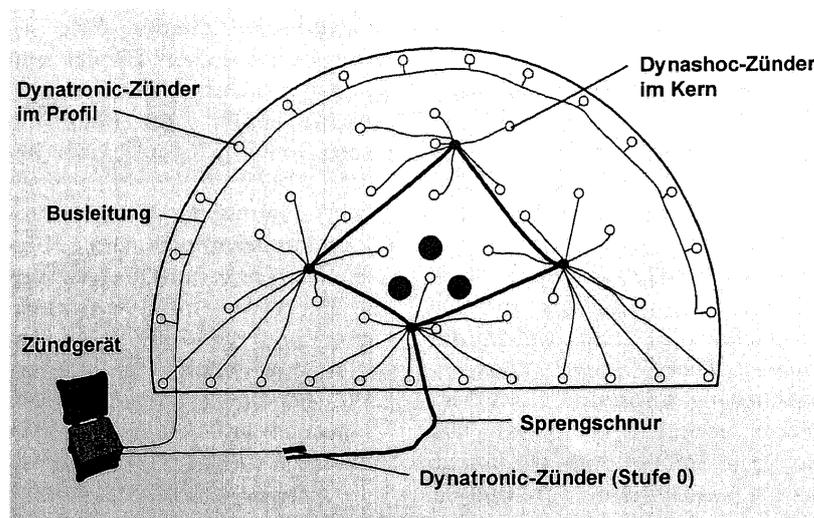


Bild 5. Zündsystemkombination für profilgerechtes Sprengen
 Fig. 5. Detonator systems for precise section blasting

baren Manschette ausgerüstet werden zur temporären Abdichtung des Bohrlochs bis zum Gelingen, dann könnte die Lanze gezogen und das nächste Bohrloch beschickt werden. Möglicherweise könnte die Bohrlochfüllung mit einem computerunterstützten Kombinationsbohrgerät erfolgen analog zur Ankerbohr- und -setztechnik.

4 Schutter- und Transporttechnik

Bei der Schutter- und Transporttechnik lassen sich heute folgende Tendenzen erkennen:

- Schutterung mit Fahrlader oder Universalgeräten, eventuell mittels Remote-Control zur Erhöhung der Arbeitssicherheit
- Bandverladeanlage mit Zerkleinerungshammer oder Brecheranlage
- mechanisierte, aufgehängte, fahrbare Bühnen-Brückentechnik zum Beladen der Transportgeräte (Pneuo- oder gleisgebundene Geräte) zur räumlichen Entflechtung von Sohl-sicherung und Materialtransport
- Transport mittels Förderband-technik und integriertem Band-speicher
- Remote-Control des Schutter-zuges.

Für den Einsatz im Bergbau studiert man ein System für die Schutterung und den Transport, das ferngesteuert und automatisiert abläuft [6]. Mit einer Sensorik und Leittechnik, eingebaut auf der Strecke und in der Hydraulik der Schuttergeräte, soll das Gefühl des Maschinisten besonders während des Ladevorgangs erfaßt und in Steuerungsimpulse umgesetzt werden, um die Maschine optimal einzusetzen und um sie vor Überbelastung zu schützen. Der Ladevorgang wie auch der Transport kann mit einem Führungssystem vom Bildschirm aus im gesicherten Bereich überwacht werden. Die Gefahren für das Untertagepersonal können dadurch wesentlich vermindert werden, Verschleiß und Arbeitsunterbrechungen können ebenfalls reduziert werden. Ferner kann die Fahrweise wirtschaftlich optimiert und ein noch effizienterer Einsatz der Maschine ermöglicht werden. Falls sich die-

ses automatisierte System im Bergbau als funktionstüchtig, robust und kosteneffizient herausstellen wird, kann die Erprobung auch im Tunnelbau erfolgen.

5 Automatisierung bei der Fels-sicherung

5.1 Einleitung

Die größten Vorteile von Roboter-technik und Automatisierung liegen darin, daß durch ihren Einsatz folgende Effizienzsteigerungen erreicht werden sollten:

- große und konstante Leistung
- gleichmäßige und hohe Qualität
- Senkung der Kosten
- Verbesserung der Arbeitssicherheit und Reduktion der gesundheitsgefährdenden Arbeiten
- relativ große Flexibilität in bezug auf roboterisierte hohe Leistungen und manuelle Führung für kleinere spezielle Anwendungen.

Bei der Fels-sicherung sind folgende Systeme zu betrachten:

- Anker-setztechnik
- Bogenversetz- und Bewehrungs-netzinstallationstechnik
- Spritzbetontechnologie.

5.2 Anker-setztechnik bei Systemankerung

Die Entwicklung der Anker-setz-technik kann anhand von Bild 6 verdeutlicht werden:

- manuelle Technik – manuelles Bohren und Setzen der Anker
- halbmechanisierte Technik – maschinelles Bohren, manuelles Anker-setzen
- vollmechanisierte Technik – maschinelles Bohren und Anker-setzen.

Die manuelle Ankertechnik wird in den Hochlohnländern nur noch eingesetzt, wenn wenige einzelne Anker zu setzen sind. Dies erfolgt in der Kostenabwägung zwischen Gerätevorhaltung und dem Mehrzeitverbrauch zum manuellen Installieren.

Das vollmechanisierte Bohren und Setzen der Anker könnte in Verbindung mit einer robusten Mikroelektronik und einer computerunterstützten Prozeßsteuerung erweitert werden und zur Erhöhung der Kosteneffizienz und Leistungssteigerung beitragen.

Das systematische Anord-nungsschema der Anker kann ent-

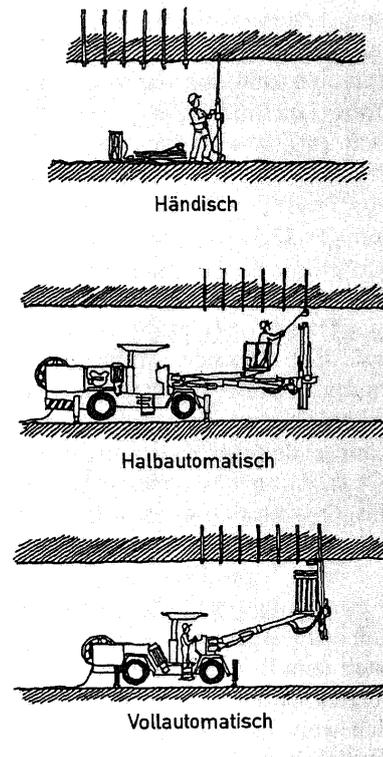


Bild 6. Entwicklung der Anker-setztechnik

Fig. 6. Development of rock bolting

sprechend den individuellen geologischen Verhältnissen auf der Baustelle mittels eines einfachen CAD-Programms festgelegt bzw. angepaßt werden. Die Ankeranordnung kann über eine Diskette in den Bordcomputer des teilroboterisierten Gerätes eingelesen werden. Die Sensortechnik zur Positionierung des Bohrarms, des Bohrablaufs sowie die Positionierung der Bohrarme zur Tunnelachse ist identisch zur erläuterten Sprenglochbohrgerätetechnik.

Zum roboterisierten Setzen der Anker sind folgende Zusatzeinrichtungen und -funktionen notwendig:

- hochmechanisiertes Lademagazin der Ankerstäbe, möglichst für unterschiedliche Stablängen, das einfach nachgeladen werden kann
- automatisierte, mechanische Schwenkeinrichtung für Bohreinrichtung, Setzvorrichtung für Schnellbinderzement- oder Kunstharzkomponentenpatrone und Ankerinstallationsvorrichtung
- automatisierte, mechanische Kopplung von Ankern während des Setzvorgangs.

Diese Vorgänge einschließlich des Ansteuerns der Bohransatzpunkte könnten voll automatisiert ablaufen, dadurch würde eine sehr hohe Leistung erzielt. Dies wirkt sich positiv auf den wirtschaftlichen und baubetrieblichen Ablauf aus, besonders bei kurzen Stehzeiten des Gebirges, und auf die gekoppelten baubetrieblichen Nachfolgeprozesse.

Dieses Spezialgerät könnte auf der Grundeinheit eines computerisierten Bohrwagens aufgebaut sein. Folgende Vorteile können dabei erreicht werden:

- Erhöhung der Arbeitssicherheit des Operators, da er sich in der Fahrerkabine im bereits gesicherten Bereich des Tunnels befindet.

- Beschädigungen am Gerät werden weitestgehend vermieden, da nach dem Bohren sofort der Anker gesetzt wird und somit das Gerät sich weitestgehend im gesicherten Bereich befindet.

- Im Fall der Verwendung von Verbundankern mit schnellerhärtenden Zement- oder Kunstharzpatronen wird die Qualität durch das pneumatische Laden verbessert, da die Patronen ohne mechanische Schädigung eingebracht werden können.

- Leistungserhöhung durch die roboterisierten Vorgänge im Einmannbetrieb, wie z. B.:

- Bohrlochansteuerung
- Bohrvorgang mit Steuerung der Bohrtiefe
- Ankersetzvorgang mit abgestuften Ankerlängen.

Die wirtschaftliche und kosteneffiziente Anwendung und somit die Entscheidung über den Einsatz eines solchen roboterisierten Ankersetzsystems ergibt sich u. a. aus folgenden Problemstellungen:

- systematisches Sichern mittels Anker oder nur vereinzelte Anwendung

- Ankersystem und -längen

- Lohnniveau und Operatorqualifikation

- Größe und Logistik der Baustelle

- Robustheit und Servicefreundlichkeit des Systems.

Die Anker und das Ankersetzsystem bilden eine Einheit. Das bedeutet, daß beide Systeme aufein-

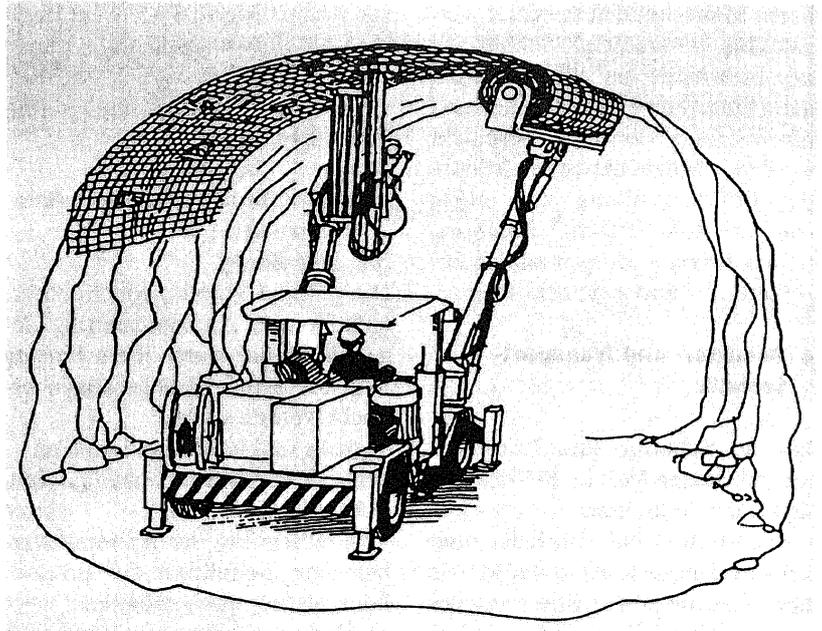


Bild 7. Versetzen von Netzen und Anker durch Remote Control
Fig. 7. Placement of steel mesh and rock bolts by remote control

ander abgestimmt sein müssen. Dadurch kommt es zu einer Selektion von Verankerungssystemen, die sich besonders einfach in einem automatisierten Prozeß versetzen lassen.

Man kann die Ankersysteme nach der Verankerungstechnik wie folgt untergliedern:

- **mechanische Verkeilung** am Ende des Ankers mit dem Fels

- **Verbundwirkung durch Vermörtelung oder Kleber** über die gesamte Ankerlänge oder nur im Endbereich

- **Reibungsanker** über die gesamte Ankerlänge

Die verwendeten Ankersysteme sind entweder **schlaff** oder **vorgespannt**. Als Ankerstabmaterial verwendet man glatte und gerippte, normale und hochfeste Baustähle, hochfeste Vorspannlitzen und glasfaserverstärkte Kunststoffanker (GFK-Anker), sowie temporäre Swellex Anker.

5.3 Einbaubogenversetz- und Betonstahlmattenverlegegeräte

Für das Setzen von Einbaubögen wäre eine Rationalisierung durch ein mechanisiertes und teilroboterisiertes Verlegegerät von großem Vorteil. Die Ansätze dazu sind vielversprechend, bedürfen aber auch

hier noch gemeinsamer Anstrengungen von Forschung, Untertagebauunternehmungen und Spezialmaschinenherstellern.

Wichtig ist die Abstimmung der Einbauprofilquerschnitte und deren mechanisierbare Verbindungstechnik. Zudem müssen sich die Profile ohne Schattenbildung einspritzen lassen. Hier sind noch effizienzsteigernde Verbesserungen möglich. Dies gilt auch für Betonstahlmattenverlegegeräte (Bild 7).

Die Entwicklung und der Einsatz solcher mechanisierter und teilroboterisierter Verlegegeräte wird sich dann als wirtschaftliche Lösung erweisen, wenn das Sicherungs- und Einbaukonzept auf ein solch effizientes System abgestimmt werden kann.

5.4 Spritzsysteme und -roboter 5.4.1 Spritzbetonsysteme

Die Entwicklung der Spritzbetontechnik hat in den letzten Jahrzehnten große Fortschritte gemacht. Dies betrifft das Trocken- sowie das Naßspritzverfahren in bezug auf

- Materialtechnik
- Beschickungstechnik
- Fördertechnik
- Spritztechnik.

Die **Naßspritztechnik** (Bild 8) hat sich im Tunnelbau u. a. bedingt

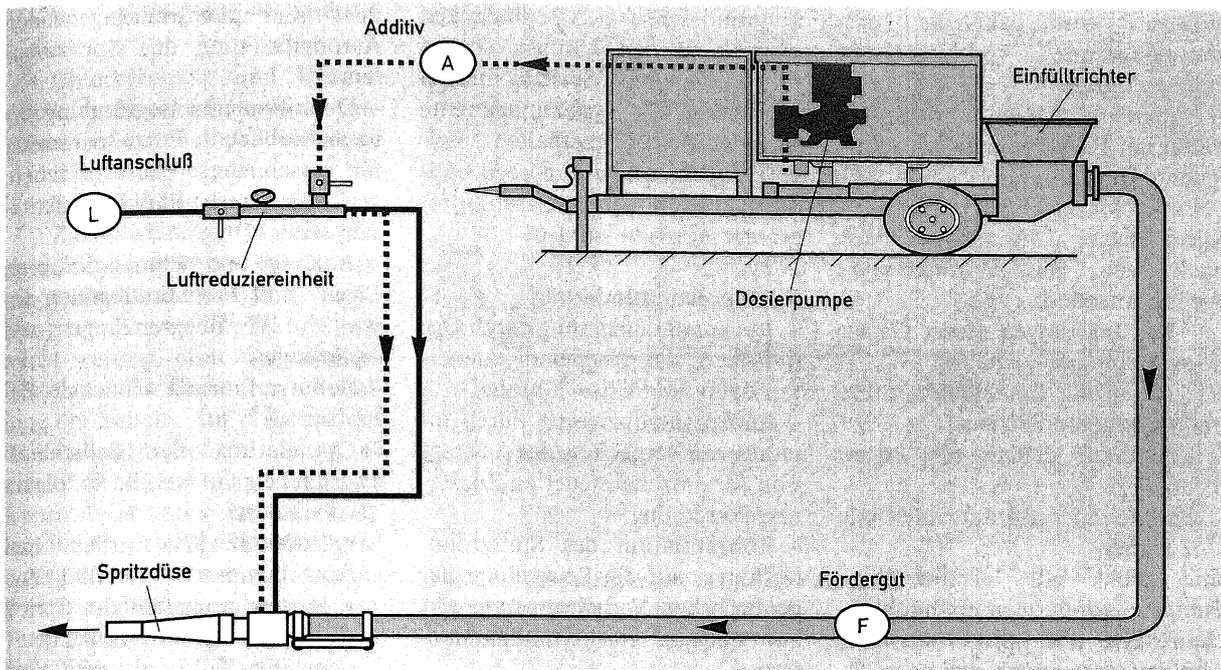


Bild 8. Naßspritzsystem
Fig. 8. Wet shotcrete system

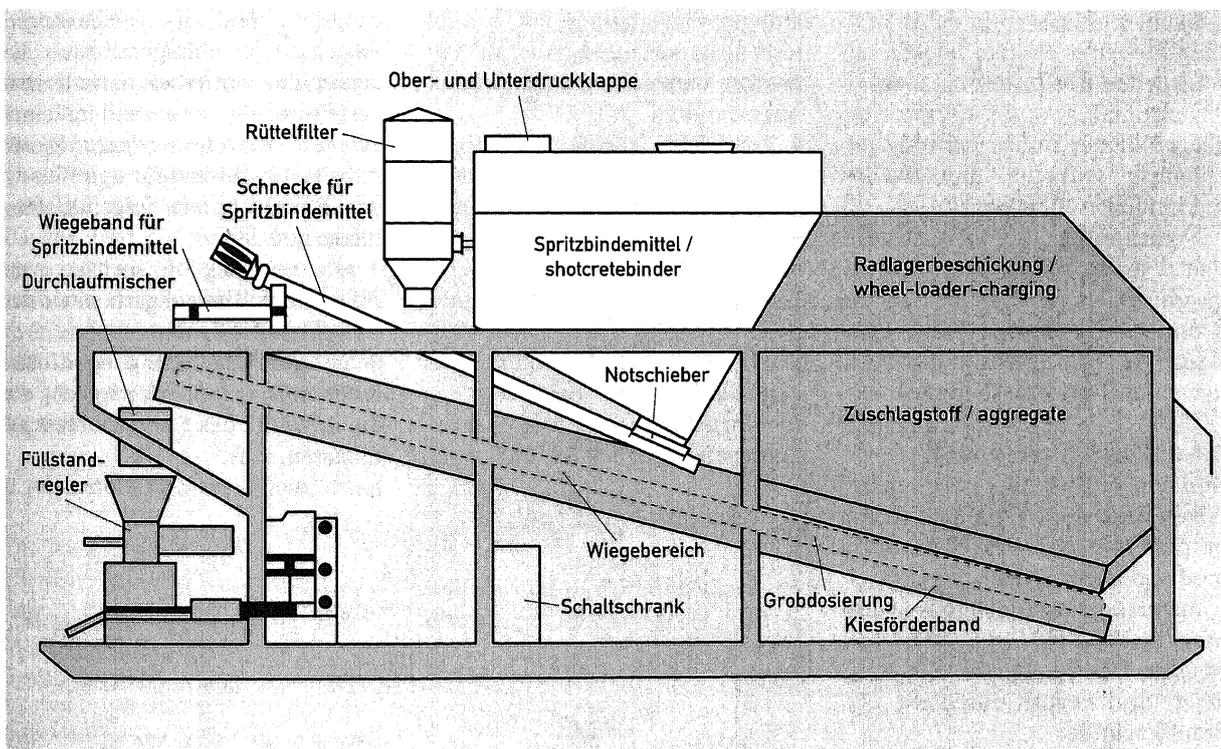


Bild 9. Trockenspritzsystem [PHS-Porr]
Fig. 9. Dry shotcrete system [PHS-Porr]

durch folgende Vorteile durchgesetzt:

- hohe Applikationsleistungen > 8 bis 20 m³/h besonders durch Einsatz von Kolbenpumpen und Spritzmanipulatoren und in Zukunft durch Spritzroboter

- geringerer Rückprall (Verlust, Sonderabfall)
- geringere Staubbelastung (Gesundheitsgefährdung)
- gesicherter w/z-Wert < 0,5 durch Vormischen und damit geringere Qualitätsstreuungen, allerdings nur

mit Hilfe von chemischen Verflüssigern

- Abbindebeschleuniger kann in definierter Menge zugegeben werden.

Auch beim **Trockenspritzverfahren** (Bild 9), das im Tunnelbau

eingesetzt wird, haben sich effizienzsteigernde Verbesserungen ergeben durch:

- Entwicklung von Spritzbindemittel mit Beschleuniger für naturfeuchte Zuschläge
- Entwicklung von flexiblen Mischanlagen, die das Gemisch nach Bedarf und Anforderungen vor Ort mischen.

Die Leistungen dieser Geräte liegen heute bei $< 8 \text{ m}^3/\text{h}$.

Um große Tunnelquerschnitte mit Spritzbeton effizient:

- schnell zu sichern (die ersten 5 cm)
- die mächtigere Spritzbetonschale einzubauen sind nicht nur leistungsfähige Pumpen, sondern auch **hochmechanisierte und teilroboterisierte** Applikationssysteme erforderlich. Die Anforderungen an die Hochleistungsspritzsysteme, die für Trocken- und Naßspritzverfahren einsetzbar sind, sind:
 - baubetrieblich optimiertes, prozeßgesteuertes System für die verschiedenen in-situ-Verhältnisse
 - gleichmäßige hohe Qualität bei gleichmäßiger hoher Leistung unabhängig von der individuellen menschlichen Leistungskurve
 - Verbesserung der Arbeitssicherheit und Reduktion der Arbeitsbelastung
 - nachhaltige Bewirtschaftung der Baustoffe, geringere Materialverluste und Umweltbelastung.

5.4.2 Spritzbetonroboter

Spritzroboter als Hochleistungsapplikationssystem (Bild 10) sollten in den folgenden Hauptbetriebsmodi einsetzbar sein:

- manuelle Führung mittels Space-mouse (Joystick) und rechnergesteuerte Bewegung des achtgelenkigen Spritzarmes durch die Hydraulikzylinder
- automatische Führung durch prozeßgesteuerte Abläufe der baubetrieblichen Arbeitstechniken mittels Menüführung.

Dazu ist es notwendig, der entwickelten Steuerungssoftware die baubetriebliche Intelligenz der Applikationstechnik zu implementieren.

Die verschiedenen leistungsrelevanten Betriebsmodi, die von dem Düsen- bzw. Spritzenführer

aufgrund der lokalen Bedingungen gewählt werden können, sollten die optimierten Spritztechniker-fahrungen als systemimmanente Prozeßsteuerung enthalten. Folgende Problemkreise müssen optimiert und in das Steuerungsprogramm integriert werden:

Ressourcenoptimierung

- Rückprallreduzierung durch Optimierung der programmgesteuerten Bahn- und Düsenführung
- Rückprallreduzierung durch interaktive Überprüfung des Auftrags und der prozeßgesteuerten Zusatzmitteldosierung
- Konzentration des Spritzroboterführers auf die Beurteilung der geologischen Verhältnisse vor Ort zur Eingabe von Grundparametern.

Leistungs- und Qualitätsoptimierung

- Ausbau des Systems als Hochleistungsspritzverfahren zur schnellen Sicherung und Ausbau von großen und sehr großen Tunnelquerschnitten
- homogene, konstante Spritzbetonqualität mit geringer Qualitätsstreuung und der damit verbundenen Erhöhung der Dauerhaftigkeit

Baubetriebliche Roboteroptimierung

- interaktive Entwicklung der baubetrieblichen Prozeßparameter in Zusammenarbeit mit Maschinenherstellern und Baustellen mit

dem Ziel der weitestgehenden Automatisierung des Spritzroboters

- Definition und Begründung der baubetrieblichen Prozeßparameter für verschiedene Auftragsflächen, gegliedert nach Rauigkeitskriterien etc.
- Analyse und Elimination von Eigen- und Fremdkollisionen sowie von Profilbegrenzungen und -sperrungen
- Benutzerführung einzelner Betriebsmodi
- Optimierung der Schichtauftragsflächen auf der Basis folgender Parameter:
 - Differenz [7] Ausbau- und Ausbruchquerschnitt (Bild 11)
 - Hafteigenschaften des Spritzbetons auf der Auftragsfläche.

Im Regelfall wird unmittelbar nach dem Ausbruch des Hohlraums eine ca. 5 cm dicke Versiegelungsschicht aufgespritzt. Anschließend werden eine Bewehrungslage und die Ausbaubögen eingebaut. Nachfolgend kann die eigentliche Spritzbetonschale hergestellt werden, eventuell mit einer zweiten Bewehrungslage. Dieser Arbeitsablauf weist für den Einsatz des Spritzroboters folgende Probleme auf:

- schattenfreies Einspritzen von Bögen und Gitterträgern sowie der Bewehrung
- mehrere Arbeitsgänge mit Unterbrechungen sind erforderlich, die die Effizienz des Spritzroboters reduzieren, z. B:

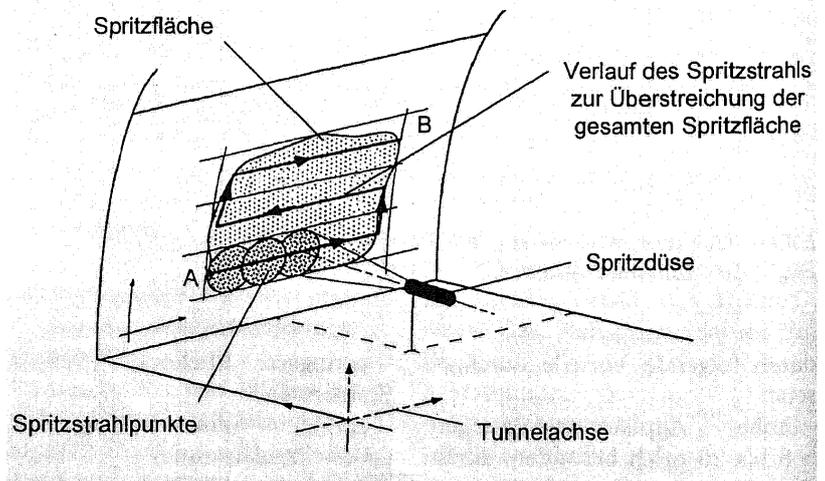


Bild 10. Führungsbahnen eines Spritzroboters
Fig. 10. Trajectory of shotcrete robot

- Versiegelungsschicht aufbringen
- Unterbrechung und Umstellung des Spritzroboters zum Einbau der ersten Bewehrungslage und der Gitterträger
- Traggewölbe einspritzen.

Zur vollständigen Nutzung des Produktionspotentials des Spritzroboters muß die maximale Auslastung am Einsatzort (Bild 12) erreicht werden, ohne mehrmaliges Umsetzen des Gerätes zur Erstellung der Schale. Zur Nutzung des Rationalisierungspotentials ist es unbedingt notwendig, daß die Konstruktion sowie der Arbeitsablauf für das jeweilige Bauwerk robotergerecht gestaltet wird. Gerade die Spritzbetonverarbeitung im Tunnelbau [7] verlangt eine Produktivitäts- und Qualitätssteigerung. Daher erscheint es sinnvoll zu sein, die Tragschalen als biege-weiche Membranschalen auszuliegen und aus Faserspritzbeton herzustellen. Dabei entfällt der arbeitsunterbrechende Schritt des Bewehrens sowie die Probleme von Spritzschatten und erhöhtem Rückprall.

Die gesamtheitliche, robotergerechte Gestaltung könnte die Bauzeit und die Baukosten reduzieren, dabei muß gleichzeitig eine sinnvolle Bandbreite an konstruktiver und baubetrieblicher Flexibilität möglich sein zur Anpassung an geologische und geometrische Veränderungen.

6 Anforderung an die Ausbildung

Die Ausbildung muß mit der Mechanisierung und Automatisierung Schritt halten. Es werden in Zukunft weniger, aber sehr gut ausgebildet handwerkliche Mitarbeiter benötigt, um die technologisch immer komplexer werdenden Geräte zu führen, und um die Effizienzsteigerungspotentiale voll zu nutzen. Der **Untertagebauer** ist wie der Grundbauer und der Straßenbauer ein Spezialist. Es würde sich lohnen, bei den anstehenden Aufgaben im Tunnelbau einen eigenen Berufsstand, in Anlehnung an die des alten Mineure, zu schaffen. Durch den vermehrten Einsatz von teilroboterisierten Geräten würde auch gleichzeitig die Attraktivität

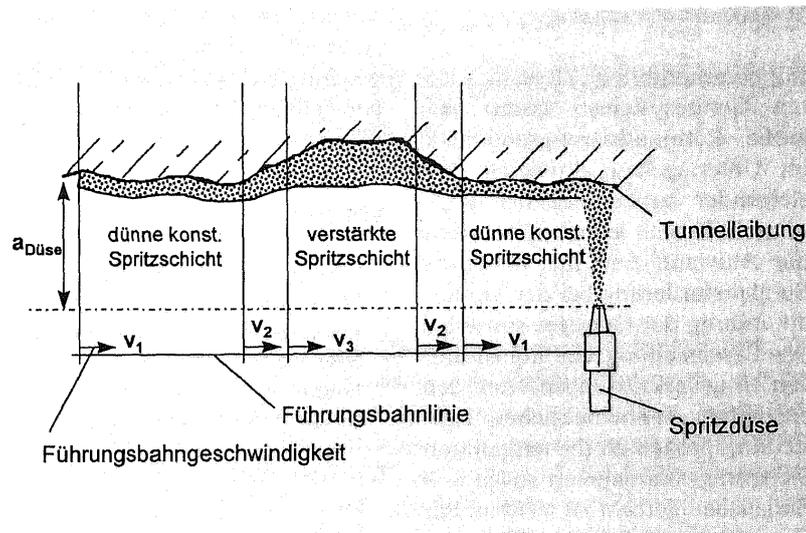


Bild 11. Robotisierter Ausgleich von Spritzdicken
Fig. 11. Robot equalization techniques for different layer thickness

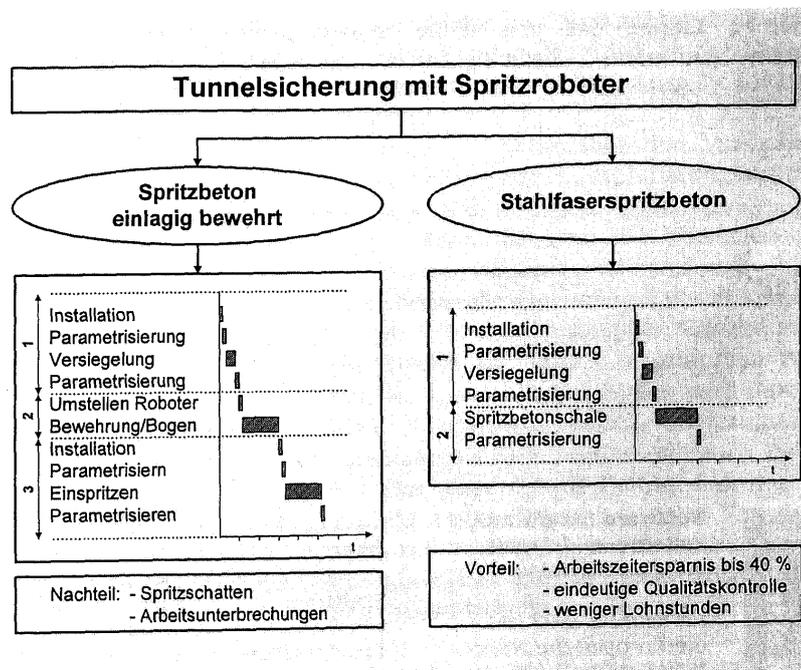


Bild 12. Optimierung von Entwurf und Sicherungstechnik für den Einsatz von Spritzroboter
Fig. 12. Optimization of design and protection measurement for application of shotcrete robot

des Untertagebauerberufs gesteigert werden, und mehr junge begabte Menschen könnten für solch hochwertige Aufgaben gewonnen werden. Es geht hier nicht um eine Fließbandfertigung, sondern um eine interaktive Aufgabe zwischen Mensch und robotisierter Maschine, um den wechselnden Bedingungen des Untertagebaus in einer sinnvollen Bandbreite gerecht zu werden.

In Japan hat sich diese positive Tendenz u. a. durch Einsatz von Baurobotern verstärkt. Junge Leute wollen weniger manuell tätig sein, sie bevorzugen die Arbeit mit moderner und herausfordernder Technik. Durch diese neuen Arbeitsbedingungen auf den Baustellen wird der Bauberuf für weitere Personengruppen attraktiv, die vorher für die Bauberufe nicht zur Verfügung standen.

7 Schlußbetrachtung

Mit den modernen teilroboterisierten Gerätesystemen lassen sich große Rationalisierungspotentiale im Untertagebau aktivieren. Mit steigender baubetrieblicher Technik erhöht sich jedoch gleichzeitig der Aufwand und die vermehrte Sorgfaltsforderung bei der Vorauserkundung der Gebirges sowie bei der Bereitstellung der konstruktiven Tragwerkslösungen, um den effizienten baubetrieblichen Herstellungsprozeß für die temporären Sicherungsmaßnahmen sowie den Endausbau gerecht zu werden. Für die baubetrieblichen effizienten Lösungsansätze sind umfangreiche Evaluationsarbeiten nötig. Die Gebirgsverhältnisse sind meist nicht homogen, daher können diese modernen Geräte das persönliche Know-how nicht vollständig er-

setzen. Der Einsatz von teuren Automaten muß stets hinterfragt werden, um für die jeweilige Aufgabenstellung die kosteneffizienteste Lösung zu finden.

Literatur

- [1] *Girmscheid, G.*: Schildvorgetriebener Tunnelbau in heterogenem Lockergestein und Sedimentböden, ausgekleidet mittels Stahlbetontübungen, – Teil 1: Geophysikalische Baugrunderkundungsmethoden. Bautechnik 74 (1997), H. 1, S. 1–10.
- [2] *Girmscheid, G.*: Schildvorgetriebener Tunnelbau in heterogenem Lockergestein und Sedimentböden, ausgekleidet mittels Stahlbetontübungen, – Teil 2: Aspekte der Vortriebsmaschinen und Tragwerksplanung. Bautechnik 74 (1997), H. 2, S. 85–100.
- [3] *Wennmohs, K.-H.*: Elektronik- und computergestütztes Bohren im

Tunnelbau. Nobel Hefte (1996), Heft 1/2, S. 14–21.

- [4] *Petzhold, J.*: Sprengstoffe und Zündmittel für die Anforderungen des Tunnelbaus heute. Nobel Hefte (1996), Heft 1/2, S. 3–13.
- [5] *Stratmann, M.*: Fensterstollen Mitholz. Tunnel (1997), Heft 4, S. 42–49.
- [6] The Toro LHD Line. Firmenprospekt 1991/1. Tamrock, Turku, Finnland, 1991.
- [7] *Nagamani Siaken, G.*: Die Automatisierung der Düsenführung zur Auftragung von Spritzbeton. Mitteilung der Ruhr-Universität Bochum, Institut für Konstruktiven Ingenieurbau, Nr. 96-8, 1996.

Autor dieses Beitrages:

Prof. Dr.-Ing. Gerhard Girmscheid, Baubetriebswissenschaft und Bauverfahrenstechnik, ETH Höggerberg, CH-8093 Zürich