



**Sonderdruck anlässlich des
40jährigen Firmenjubiläums**

Veröffentlichungstitel:

***Rationalisierung und Kosteneffizienz
beim Sprengvortrieb durch
Teil-Roboterisierung und Innovationen***

von Gastreferent:

**Prof. Dr.-Ing. Gerhard Girmscheid
Institut für Bauplanung und Baubetrieb
ETH Hönggerberg
CH-8093 Zürich**

Rationalisierung und Kosteneffizienz beim Sprengvortrieb durch Teil-Roboterisierung und Innovationen

Inhaltsverzeichnis

1 EINLEITUNG	2
2 BOHRTECHNIK	4
2.1 Die Entwicklung der Bohrtechnik	4
2.2 Bohrmaschinen	6
2.3 Teilrobotisierung der Bohrtechnik mittels Elektronik und Computerunterstützung	6
3 ENTWICKLUNGEN IN DER SPRENGTECHNIK	7
3.1 Sprengstoffe	7
3.2 Zündmittel	8
4 SCHÜTTER- UND TRANSPORTTECHNIK	10
5 AUTOMATISIERUNG BEI DER FELSSICHERUNG	11
5.1 Einleitung	11
5.2 Ankersetztechnik bei Systemankerung	11
5.3 Einbaubogenversetz- und Betonstahlmattenverlegegeräte	13
5.4 Spritzsysteme und -roboter	14
5.4.1 Spritzbetonsysteme	14
5.4.2 Spritzbetonroboter	16
6 ANFORDERUNG AN DIE AUSBILDUNG	19
7 SCHLUSSBETRACHTUNG	19

Zusammenfassung

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.

Diese Veröffentlichung ist Teil des Vortrages vom 28. August 1997, der vom Verfasser anlässlich des 40-jährigen Firmenjubiläums der Firma Meyco-Equipment in Winterthur gehalten wurde.

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 ungebremsst. Bei jedem Projekt verbessern die Maschinenhersteller auf der Grundlage der Erfahrungen der Baufirmen ihre Systeme. Für einen maschinellen TBM- oder SM-Vortrieb mit vorgefertigten Tübbingen 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, effizient diese Bodenschichten 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.

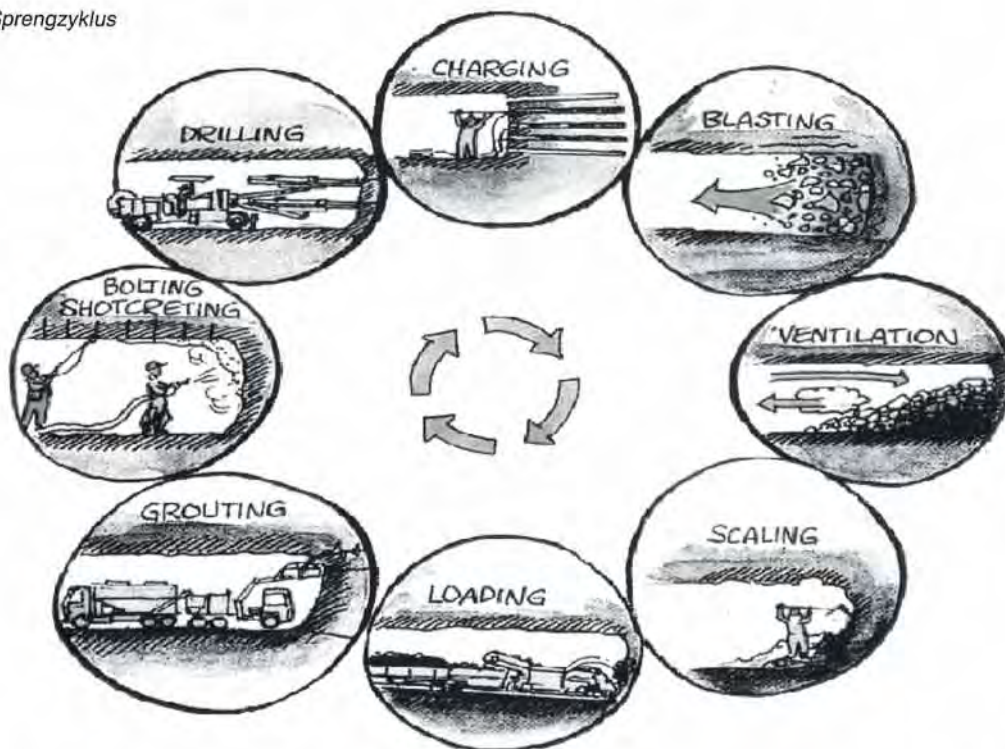
Diese sequentielle Betrachtungsweise gilt ebenso für den Sprengvortrieb in Spritzbetonbauweise. Bei der Spritzbetonbauweise werden ingenieur-geologische Kon-

zepte 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 Phaselemente (Bild 1):

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

effizient aufeinander abgestimmt werden.

Bild 1: Sprengzyklus



Trotz der Einzelemente bezüglich Gerätegruppen, Arbeitstakte, 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 Tüb-

bingauskleidung, konkurrenzfähig zu bleiben. Daher müssen die Bemühungen 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 Vergleichsmässigung**
- **Leistung**
- **Arbeitssicherheit und -bedingungen**

ist es für einen Hochleistungs-Sprengvortrieb unabdingbar, nicht nur die Einzelelemente 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 Felssicherung**
- **Anforderung an die Ausbildung.**

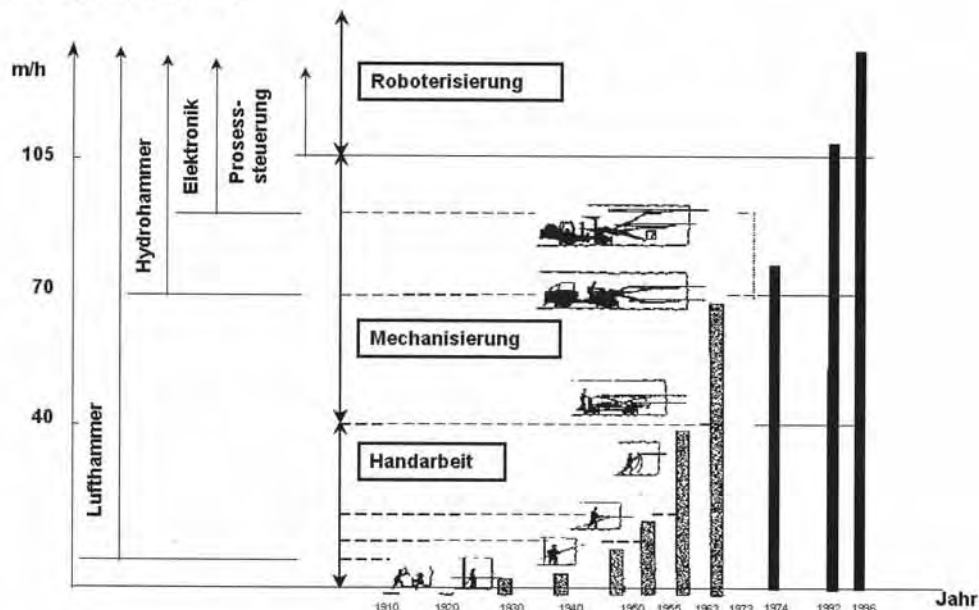
2 Bohrtechnik

2.1 Die Entwicklung der Bohrtechnik

Die Technik des Bohrens und damit die Bohrgeschwindigkeit ist in der letzten Jahren wesentlich verbessert 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 2).

Bild 2: Entwicklung der Bohrtechnik



In den letzten 20 Jahren wurden folgende wesentliche Entwicklungssprünge gemacht:

1. Entwicklung und Einführung von Hydraulikhämmern:

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

2. 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 Bohrstahls.

3. Teilrobotisierung der Bewegungsabläufe:

- computergesteuerte Positionsbestimmung

- computer-optimierte Ansteuerung der Bohrlochansatzpunkte aller Bohrarne
- Anti-Festbohrsicherungssensorik 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 Schmutzbelästigung.

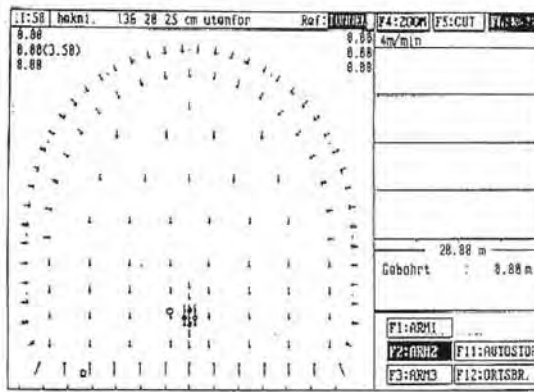
2.3 Teilrobotisierung der Bohrtechnik mittels Elektronik und Computerunterstützung

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

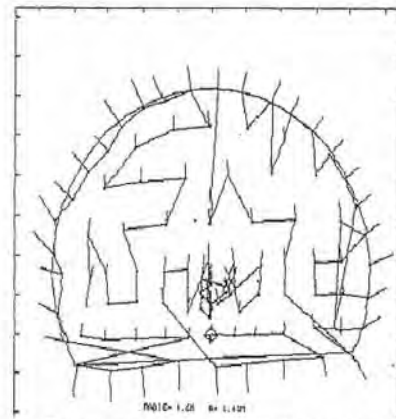
Die modernen hydraulischen Jumbos sind mit elektronischer Systemsteuerung ausgerüstet. Bei diesen **programmgesteuerten Systemen** [3] lässt sich mittels Steuercomputer, bedingt durch die kurze Reaktionszeit von Sensoren und Elektronik, eine aktive Leistungskontrolle und Steuerung durchführen.

Ferner lässt sich durch die Teilrobotisierung das auf CAD erstellte Bohrbild (Bild 3) in den Steuercomputer einlesen. Durch z.B. lasergesteuerte Positionierung wird die Bohrwagenposition zur Tunnelachse bzw. Ortsbrust bestimmt. Die Bohrarne und Lafetten lassen sich nun durch ihre dreidimensionale Kinematik programmgesteuert zu den virtuellen Bohransatzpunkten der Löcher führen (diese brauchen nicht mehr angezeichnet zu werden).

Bild 3: Teilroboterisierung des Bohrwagens [3]



CAD-Bohrbild



Programmgesteuerter Bohrvorgang

Die Bohrlafetten steuern nach optimierten, numerisch bestimmten Wegen (kürzester Gesamtweg) die Bohransatzpunkte bei Multibohrarmsystemen (Bild 4) kollisionsfrei an. Dadurch lassen sich hohe Bruttobohrleistungen und hohe Bohrgenauigkeiten erzielen und somit gute Sprengergegebnisse. Die Interaktion zwischen computergestützten Bohrens und Vortriebszyklus ist aus Bild 4 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.

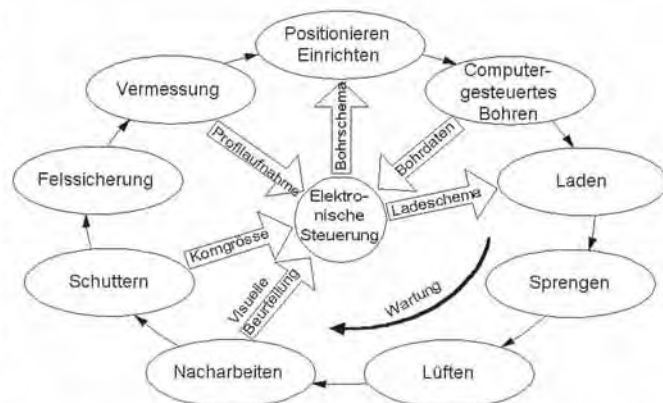


Bild 4: Interaktion des computergesteuerten Bohrens und Sprengzykluses

3 Entwicklungen in der Sprengtechnik

3.1 Sprengstoffe

Eine Vielzahl von Faktoren beeinflusst 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 Bohrlochtiefsten, wo die Verspannung des Gebirges 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 Tunnelluft 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 (Nox 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 Schuttern 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 5).

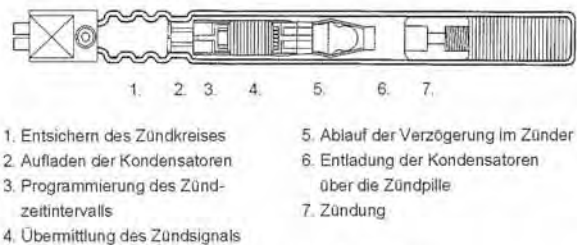


Bild 5: Elektronische Zünder [4]

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 technisch gegen Missbrauch gesichert. Das System muss durch ein kodierte Signal des Steuergerätes entsichert werden. Dann erfolgt das Aufladen der Kondensatoren der Zünder einzeln; danach erfolgt die Programmierung der Zündintervalle auch einzeln. Erst dann erfolgt nach Prüfung die Zündung.

Mittels elektronischer Zeitintervall-Steuerung lässt sich das beste Ergebnis erreichen für die:

- **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:

- Profilgenauigkeit
- bestimmte Stückigkeit des Haufwerks
- Geologie.

Aus Kostengründen kann man zur Erreichung einer grossen Profilgenauigkeit die elektronischen Zünder auf die Profillöcher beschränken (Bild 6). 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.

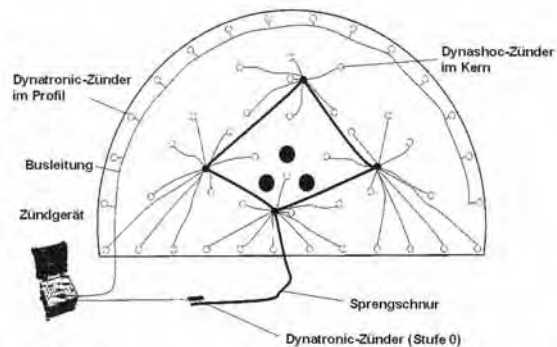


Bild 6: Zündsystemkombination für profilgenaues Sprengen [5]

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 Felssicherung 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 cm auf 10 cm gesenkt werden.

Die Sprengtechnik bildet mit der Bohrtechnik ein System. Innovationen einer Systemkomponente alleine verbessern das Ergebnis noch nicht wesentlich hinsichtlich 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 Zusammenreffen der Komponenten müssten die Stoffe sofort gelieren. Erst dann ergeben die Komponenten einen Sprengstoff. Die Lanze müsste mit einer aufblasbaren Manschette ausgerüstet werden zur temporären Abdichtung des Bohrlochs bis zum Gelieren, dann könnte die Lanze gezogen werden 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 können wir heute folgende Tendenzen erkennen:

- Schutterung mit Fahrladern oder Universalgeräten, eventuell mittels Remote-Control zur Erhöhung der Arbeitssicherheit
- Bandverladeanlage mit Zerkleinerungshammer oder Brecheranlage
- mechanisierte, aufgehängte, fahrbare Bühnen-Brückentechnik zum Beladen der Transportgeräte (Pneu- oder gleisgebundene Geräte) zur räumlichen Entflechtung von Sohlsicherung und Materialtransport
- Transport mittels Förderbandtechnik und integriertem Bandspeicher
- Remote-Controll des Schutterzuges.

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 über-

wacht werden. Die Gefahren für das Untertagepersonal können dadurch wesentlich vermindert werden, Verschleiss und Arbeitsunterbrüche können ebenfalls reduziert werden. Ferner kann die Fahrweise wirtschaftlich optimiert und ein noch effizienterer Einsatz der Maschine ermöglicht werden. Falls sich dieses automatisierte System im Bergbau als funktionstüchtig, robust und kosteneffizient herausstellen wird, kann die Erprobung auch im Tunnelbau erfolgen.

5 Automatisierung bei der Felssicherung

5.1 Einleitung

Die grössten Vorteile von Robotertechnik 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 Felssicherung sind folgende Systeme zu betrachten:

- Ankersetztechnik
- Bogenversetz- und Bewehrungsnetzinstallationstechnik
- Spritzbetontechnologie.

5.2 Ankersetztechnik bei Systemankerung

Die Entwicklung der Ankersetztechnik kann in Bild 7 verdeutlicht werden:

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

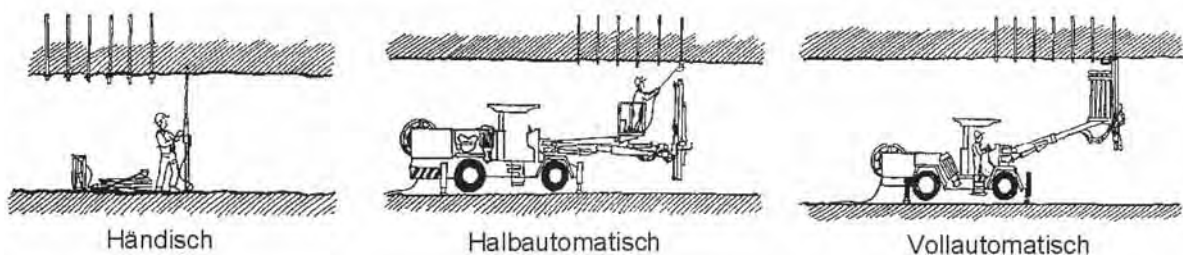


Bild 7: Entwicklung der Ankersetztechnik [3]

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 Anordnungsschema der Anker kann entsprechend 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 Sprengloch-Bohrtechnik.

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 Ankerinstallationvorrichtung
- automatisierte, mechanische Koppelung 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 einge-

bracht 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 Fragestellungen:

- 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 aufeinander abgestimmt sein müssen. Dadurch kommt es zu einer Selektion auf Verankerungssysteme, 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.

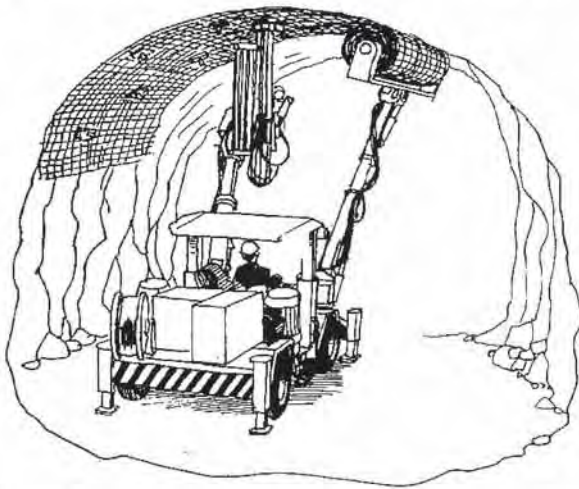
Die verwendeten Ankersysteme sind entweder schlaff oder vorgespannt. Als Ankerstabmaterial verwendet man glatte und gerippte, normale und hochfeste Baustähle, hochfeste Vorspannlitzen und glasfaserverstärkte Kunststoffanker (GFK-Anker), sowie temporäre Swellex Anker.

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 und bedürfen hier gemeinsamer Anstrengungen von:

- Forschung
- Untertagebauunternehmungen
- Spezialmaschinenhersteller.

Wichtig ist die Abstimmung der Einbauprofilquerschnitte und deren mechanisierbare Verbindungstechnik. Zudem müssen die Profile sich ohne Schattenbildung einspritzen lassen. Hier sind noch effizienzsteigernde Verbesserungen möglich. Dies gilt auch für Betonstahlmattenverlegegeräte (Bild 8).



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.

Bild 8: Versetzen von Ankern und Netzen durch Remote Control [3]

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 9) hat sich im Tunnelbau u.a. bedingt durch folgende Vorteile durchgesetzt:

- hohe Applikationsleistungen $> 8 - 20 \text{ m}^3/\text{h}$ 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.

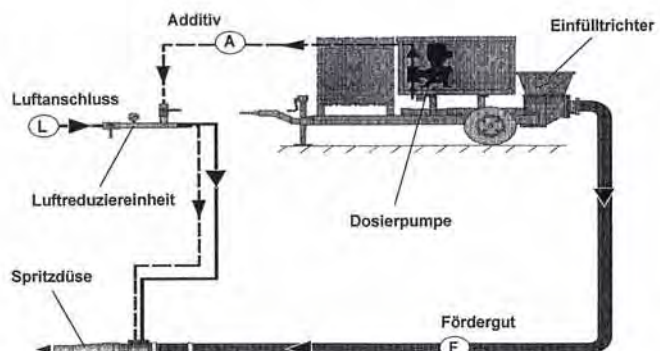
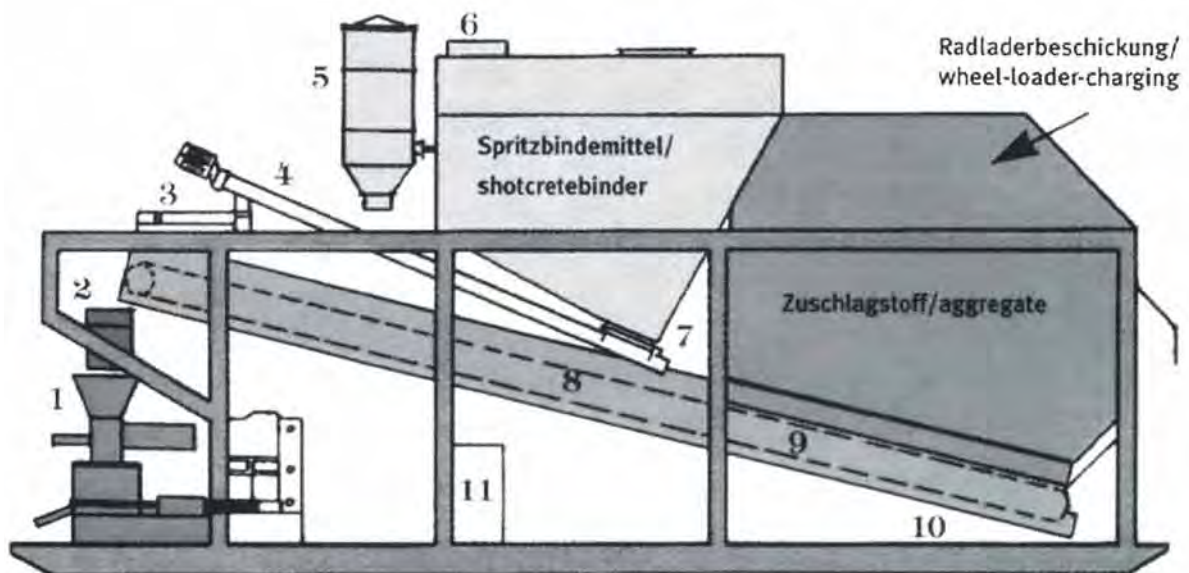


Bild 9: Meyco-Nassspritztechnik

Auch beim **Trockenspritzverfahren** (Bild 10), 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 $< 8 \text{ m}^3/\text{h}$.



- | | | |
|-----------------------------------|------------------------------|-------------------|
| 1 Füllstandregler | 5 Rüttelfilter | 9 Grobdosierung |
| 2 Durchlaufmischer | 6 Ober- und Unterdruckklappe | 10 Kiesförderband |
| 3 Wiegeband für Spritzbindemittel | 7 Notschieber | 11 Schaltschrank |
| 4 Schnecke für Spritzbindemittel | 8 Wiegebereich | |

Bild 10: Trockenspritzverfahren - Mixomat [PHS + Porr]

Um **effizient grosse Tunnelquerschnitte mit Spritzbeton**:

- schnell zu sichern (die ersten 5 cm)
- die mächtigere Spritzbetonschale einzubauen

sind nicht nur leistungsfähige Pumpen, sondern auch hochmechanisierte und teil-robotersierte Applikationssysteme erforderlich. Die Anforderungen an die Hochleistungsspritzsysteme, die für Trocken- und Nassspritzverfahren einsetzbar sind, sind wie folgt:

- 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 11) sollten in den folgenden Hauptbetriebsmodi einsetzbar sein:

- manuelle Führung mittels Spacemouse (Joystick) und rechnergesteuerte Bewegung des achtgelenkigen Spritzarmes durch die Hydraulikzylinder
- automatische Führung durch prozessgesteuerte Abläufe der baubetrieblichen Arbeitstechniken mittels Menüführung (Bild 12).

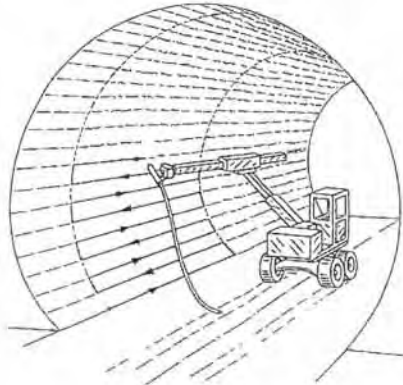


Bild 11: Spritzroboter

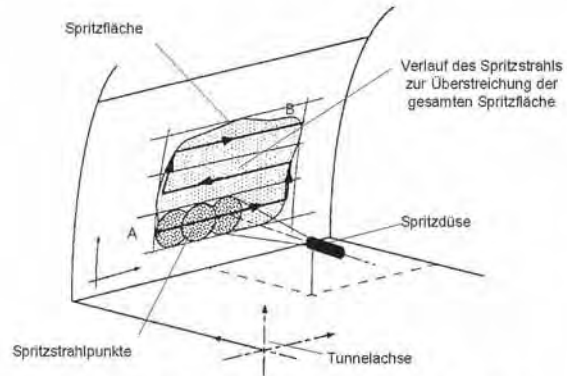


Bild 12: Führungsbahnen der Spritzroboterdüse

Dazu ist es notwendig, der entwickelten Steuerungssoftware die baubetriebliche Intelligenz der Applikationstechnik zu implementieren. Die Entwicklung eines baustellentauglichen Spritzroboters durch die Firma MEYCO-Equipment erfolgt in einer gemeinsamen wissenschaftlichen Zusammenarbeit mit:

- ETH Zürich, Baubetriebswissenschaft + Bauverfahrenstechnik
- ETH Zürich, Institut für Robotik
- MEYCO Equipment, Winterthur
- AMBERG Messtechnik, Regensburg
- Versuchstollen Hagerbach AG, VSH, Flums.

Die verschiedenen leistungsrelevanten Betriebsmodi, die von dem Düsen- bzw. Spritzenführer aufgrund der lokalen Bedingungen gewählt werden können, sollten die optimierten Spritztechnikerfahrungen als systemimmanente Prozesssteuerung enthalten. Folgende Problemkreise müssen optimiert werden und in das Steuerungsprogramm integriert werden:

1. 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

2. 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

3. Baubetriebliche Roboteroptimierung:

- interaktive Entwicklung der baubetrieblichen Prozessparameter in Zusammenarbeit mit dem Maschinenhersteller 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 Ausbau- und Ausbruchquerschnitt (Bild 13)
 - Hafteigenschaften des Spritzbetons auf der Auftragsfläche.

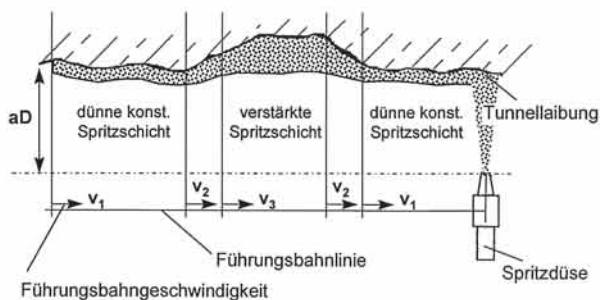


Bild 13: Änderung der Düsenführungsgeschwindigkeit eines Spritzroboters [7]

Im Regelfall wird unmittelbar nach dem Ausbruch des Hohlraums eine ca. 5 cm dicke Versiegelungsschicht aufgespritzt. Anschliessend werden eine Bewehrungslage und die Ausbaubögen eingebaut. Danach 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.:
 - 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 14) erreicht werden ohne mehrmaliges Umsetzen des Gerätes zur Erstellung der Schale.

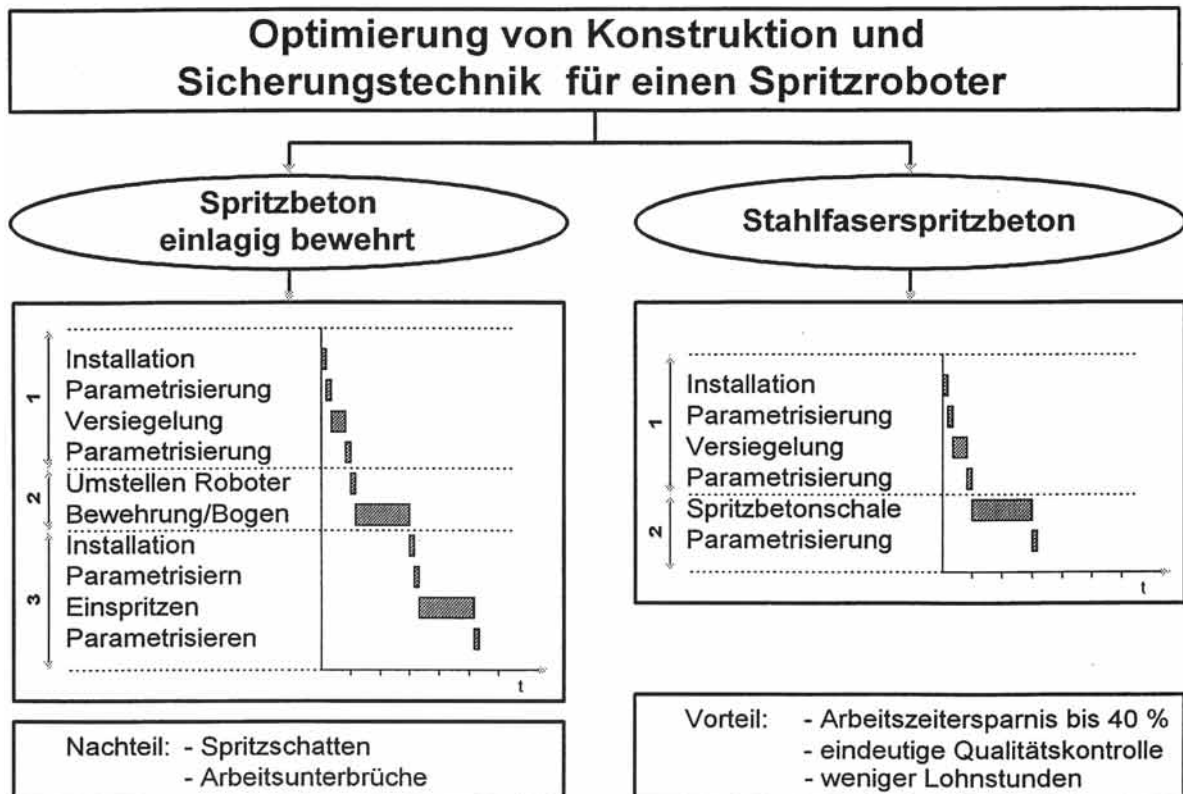


Bild 14

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 biegeeweiche Membranschalen auszulegen 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 komplexeren 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 den des alten Mineures, zu schaffen. Durch den vermehrten Einsatz von teilroboterisierten Geräten würde auch gleichzeitig die Attraktivität 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 roboterisierter 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 Sorgfalt bei der Vorauserkundung der Gebirges sowie bei der Bereitstellung der konstruktiven Tragwerkslösungen, um den effizienten baubetrieblichen Herstellungsprozess für die temporären Sicherungsmassnahmen sowie dem 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 ersetzen. 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 Stahlbetontübbingen, - Teil 1: Geophysikalische Baugrunderkundungsmethoden.
Bautechnik 74 (1997), H.1, S. 1-10.
- [2] Girmscheid, G.: Schildvorgetriebener Tunnelbau in heterogenem Lockergestein und Sedimentböden, ausgekleidet mittels Stahlbetontübbingen, - 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, Finland, 1991.
- [7] Nagamani Siaken Georges: Die Automatisierung der Düsenführung zur Auftragung von Spritzbeton. Mitteilung der Ruhr Universität, Institut für Konstruktiven Ingenieurbau, Bochum, Nr. 96-8, 1996.