

G. Girmscheid, S. Moser

Roboterisierte Felssicherung mit Spritzbeton – Entwicklung der Prozesssteuerung des vollautomatischen Applikationsprozesses

Zusammenfassung Für Leistungssteigerungen in der Hohlraumsicherung im Tunnelbau sind neue, optimierte Spritzbetonapplikationstechniken erforderlich. Heute erfolgt die Applikation von Hand oder mit Manipulatoren. Mit der Entwicklung auf dem Materialsektor wurde der Anwendungsbereich erweitert. Mit der Automatisierung des Spritzbetonauftrages kann ein wichtiger Beitrag geleistet werden, um die Bedienungsfreundlichkeit und die Qualität zu verbessern sowie den Rückprallanteil zu reduzieren. An der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich wird die vollautomatische Prozesskontrolle in einem Forschungsprojekt entwickelt. Mit der Entwicklung des „Vollautomatischen Spritzroboters für Beton“ wird der Benutzer ein leistungsfähiges Gerät zur Verfügung haben, um Spritzbetonschalen vollautomatisch aufzubringen. Mit dem neuen Roboter kann der Benutzer aus drei verschiedenen Betriebsmodi wählen: manuelles, halbautomatisches und vollautomatisches Spritzen. Vor allem der vollautomatische Modus bringt bei geringerer Gesundheitsgefährdung der Arbeitskräfte eine beträchtliche Leistungssteigerung. Die Qualitätskontrolle in Bezug auf Schichtstärke, Verdichtung und Gleichmäßigkeit wird durch den Applikationsprozess gewährleistet.

Robotised rock support with shotcrete – Development of the process control of the fully automated application process

Abstract Optimised shotcrete application techniques are required in particular tunnelling projects. Today any spraying can be done by hand or by manipulator. With the development in the material technologies the range of possible operation was enlarged. With the automation of the application, an important contribution to improve performance and quality and to reduce rebound may be achieved. At the Swiss Federal Institute of Technology Zurich systematic research is done to develop the fully automated process control, focusing on the wet shotcrete method. With the development of the “Fully Automated Shotcrete Robot” the user will have a very effective tool at his disposal to spray concrete shells (fully automated). With the new robot the user may choose from three different modes: manual, semi automated and fully automated spraying. Especially the fully automated mode facilitates higher performance with less danger to the workman's health. The quality control is inherent in the application process in regard to layer thickness, compaction, and homogeneity.

1 Einführung

1.1 Spritzbetonapplikation auf der Baustelle

Spritzbeton wird weltweit hauptsächlich in Tunnel und Baugruben als temporäre oder definitive Sicherung einge-

setzt. Die Applikation von Spritzbeton ist anstrengend, wenn sie händisch durch den Düsenführer erfolgt, und deshalb ermüdend. Dies gilt im Besonderen für die Verwendung von Nassspritzbeton. Die gängigen Spritzleistungen sind 5 bis 8 m³/h, wenn von Hand gespritzt wird, und bis 20 m³/h bei der Applikation mit einem Manipulator (es werden auch Leistungen von 30 m³/h gefahren). Das Aufbringen von Spritzbeton als erste Sicherungsmaßnahme erfolgt häufig in einer Gefahrenzone (Steinfall). Durch den Einsatz des Roboters kann die Sicherheit der Arbeitskräfte verbessert werden. Die Handhabung des Roboters ist einfacher und weniger anstrengend als die Steuerung eines Manipulators. Der grundlegende Unterschied zu herkömmlichen Manipulatoren ist, dass der Düsenführer im manuellen und halbautomatischen Modus direkt die Düsenbewegung steuert. Er muss sich nicht um die verschiedenen Gelenke kümmern. In diesen Modi kann der Düsenführer der Felsoberfläche die erforderliche Aufmerksamkeit schenken, um die geforderte Spritzbetonschicht aufbringen zu können. Im vollautomatischen Modus wird die Kontrolle durch den Roboter übernommen.

1.2 Abgrenzung gegenüber Industrierobotern

In einer Spritzzelle ist der Arbeitsbereich abgegrenzt. Das Trägerfahrzeug bewegt sich in Korridoren und wiederholt vorgegebene Bewegungsabläufe. Die Geometrie des Werkstücks wird direkt über CAD eingelesen. Im Tunnelbau (Sprengvortrieb) variiert das Ausbruchprofil stark, es ist nicht einmal pro Abschlag konstant. Das ausgebrochene Profil muss jeden Abschlag neu erfasst werden. Das theoretische Tunnelprofil ist gegeben. Die Handhabung des Roboterwerkzeuges, der Spritzdüse, entspricht derjenigen in der industriellen Fabrikation [1]. Wesentliche Unterschiede sind die Positionierung des Trägerfahrzeuges, die Datenerfassung sowie die Spritzleistung und Spritzgutzusammensetzung. Mit der Vermessung der Abschläge erfolgt die Selbstpositionierung des Trägerfahrzeuges des Roboters. Diese Messdaten werden gespeichert und sind jederzeit abrufbar. Jeder Auftrag von Spritzbeton in einer gegebenen Schichtstärke hat den Charakter eines Prototyps. Aus Gründen der Arbeitssicherheit ist die Bewegungsplanung des Trägerfahrzeuges kein Ziel der Automatisierung.

2 State of Art

Beton und Maschinenteknik wurden in den letzten 15 Jahren weltweit durch intensive Forschung weiterentwickelt. Die Entwicklungen umfassen die Betonchemie (Betonverflüssiger, Pumpherter, Verzögerer, Abbindebeschleuniger etc. [2]) wie auch das Equipment (Spritzbetonmaschinen, Dosier- und Düsensysteme), aber kaum die Applikationstechnik. Untersuchungen in Deutschland [3], [4], [5], [6], [7], [8] und Österreich [9] konzentrieren sich hauptsächlich auf die Trockenspritztechnologie. In der Schweiz ist die Forschung mehr auf die Nassspritztechnik ausgerichtet [10], [11], [12].

Prof. Dr.-Ing. Gerhard Girmscheid

Institut für Bauplanung und Baubetrieb, Professur für Baubetriebswissenschaften und Bauverfahrenstechnik, ETH Zürich, CH-8093 Zürich

Dipl.-Ing. Stefan Moser

Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Bauplanung und Baubetrieb, ETH Zürich

2.1 Spritzen von Hand

In vielen Fällen wird Spritzbeton noch immer händisch vom Düsenführer aufgebracht. Die körperliche Belastung limitiert die Spritzleistung. Die Applikationstechnik muss geschult werden und erfordert viel Erfahrung. Die Arbeit verlangt, selbst für geübte Düsenführer, hohe Konzentration. Um eine optimale Qualität und minimalen Rückprall zu erhalten, muss der Düsenführer die richtige Distanz und den richtigen Winkel zur Felsoberfläche einhalten. Um die optimale Spritzposition einhalten zu können, erfolgt der Spritzbetonauftrag in großen Tunnelquerschnitten von Hebebühnen aus. Ist der Spritzwinkel nicht rechtwinklig zur Oberfläche, vergrößert sich der Rückprall. Die richtige Spritzdistanz hängt von der Geschwindigkeit des Spritzbetons an der Düse ab. Typische Spritzdistanzen bewegen sich zwischen 1 und 2 Metern. Die Erfahrung auf der Baustelle zeigt, dass es nicht möglich ist, die bestmögliche Kombination der Einflussparameter einzuhalten.

2.2 Spritzen mit Manipulatoren

Die Spritzleistung kann durch den Einsatz von Manipulatoren gesteigert werden (**Bild 1**). Die Arbeitsbelastung des Düsenführers ist dann nicht mehr der bestimmende Faktor für die Spritzleistung. Aus diesem Grund werden Pumpen mit größerer Förderleistung und Förder-schläuche mit größerem Durchmesser eingesetzt, dies reduziert die Pulsation im Förderstrom. Daraus resultiert eine verbesserte Gleichmäßigkeit des aufgetragenen Spritzbetons.



Bild 1. MEYCO-Robojet Manipulator
Fig. 1. MEYCO-Robojet manipulator

Die Gelenksteuerung macht es schwierig, die Düse konstant rechtwinklig zur Oberfläche und in der empfohlenen Spritzdistanz zu halten. Selbst mit einer Fernsteuerung ist es beim Einsatz eines Manipulators infolge schlechter Sicht, verursacht durch den Spritzstaub, und der zu großen Distanz des Düsenführers zum Spritzstrahl wie auch dem ungünstigen Blickwinkel schwierig, die Qualität gleichmäßig auf hohem Niveau zu halten [13], [14], [15].

2.3 Spritzen mit Robotern

Um die Spritzbetonqualität zu verbessern und den Applikationsprozess zu vereinfachen, wurde ein Roboter entwickelt, der auf dem bewährten mechanischen Prinzip des MEYCO-Robojet basiert [16], [17]. Der Spritzroboter ist auf einem Trägerfahrzeug montiert, welches während der Spritzbetonapplikation stationär bleibt. Die Position der Düse bezieht sich deshalb immer auf das Trägerfahrzeug.

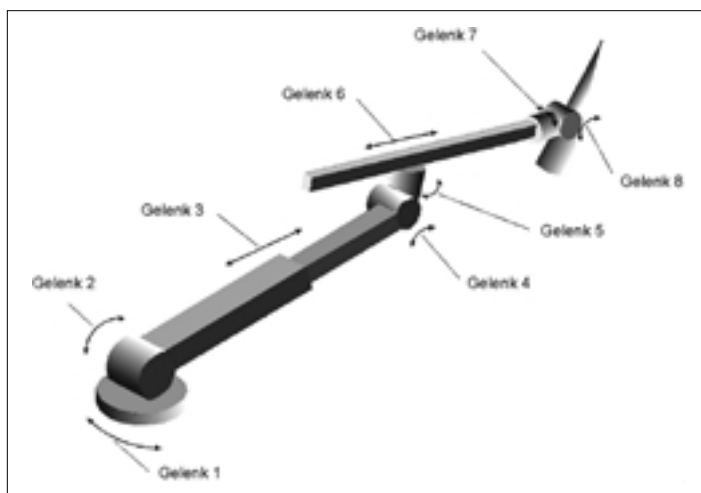


Bild 2. Spritzarm (8 Freiheitsgrade)
Fig. 2. Boom-System (8 degrees of freedom)

Der Spritzroboter besteht aus drei Teilen, dem Ausleger (mit den Gelenken 1, 2, 3, 4, 5), der Lanze (mit dem Gelenk 6) und der Düse (mit den Gelenken 7 und 8). Der Roboter besitzt 8 Freiheitsgrade (**Bild 2**). Der elektro-hydraulische Manipulator ist mit robusten Sensoren ausgerüstet, wovon sechs auf Winkelmessung und zwei auf einem linearen Messprinzip beruhen. Die Sensoren ermitteln laufend die Position eines jeden Gelenkes. Zusätzlich zu den 8 Gelenken wird ein Gelenk für die Düsenrotation benötigt (Öffnungswinkel $\varphi_{\text{Rot}} = 4^\circ$), um eine verbesserte Verteilung des Spritzbetons zu erreichen. Dieses Gelenk hat keinen Einfluss auf das kinematische Modell des Spritzarms.

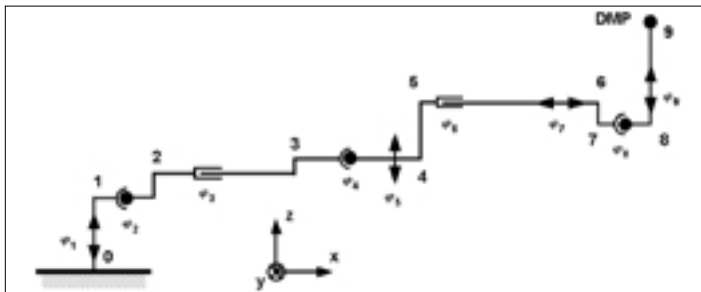


Bild 3. Definition der Winkel für die Kalkulation
Fig. 3. Definition of the angles of calculation

Der Vektor φ setzt sich zusammen aus den Winkeln der Gelenke und Translationsverschiebungen (φ_3 und φ_6), die den Arbeitsraum des Roboters definieren (**Bild 3**):

$$\varphi^T = [\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4, \varphi_5, \varphi_6, \varphi_7, \varphi_8]^T$$

Die Steuerung erfordert die Kontrolle von 5 Freiheitsgraden, z. B. der Position des Düsenmittelpunktes (DMP) (x, y, z) und Winkel für die Orientierung der Düse (φ_7, φ_8). Um die Problematik der Redundanz zu lösen, ist die Kopplung von Gelenken erforderlich:

$$\varphi_5 = -\frac{\varphi_1}{3} \quad (1)$$

Gleichung (1) ermöglicht die rechtwinklige Ausrichtung der Düse zur Felsoberfläche (**Bild 4**).

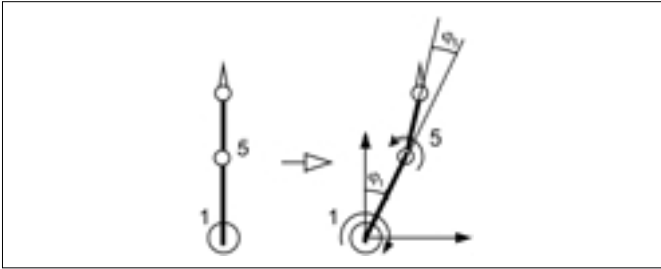


Bild 4. Funktionsprinzip (Gleichung (1))
Fig. 4. Illustration constraint 1

$$\varphi_4 = \frac{1 + \varphi_2}{6} \quad (2)$$

Gleichung (2) schließt die Kollision zwischen Ausleger (Teil 3) und Lanze (Teil 6) aus (**Bild 5**).

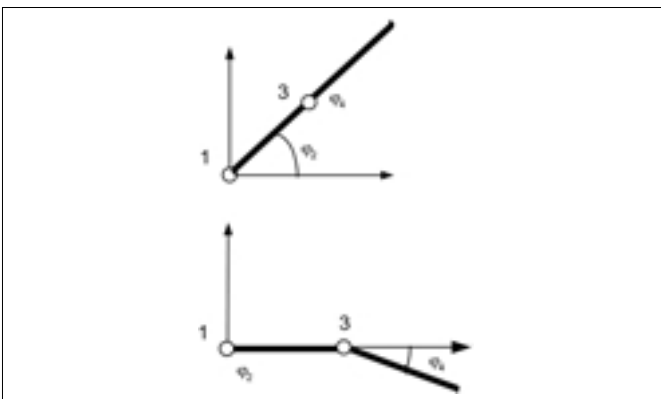


Bild 5. Funktionsprinzip (Gleichung (2))
Fig. 5. Illustration constraint 2

$$\varphi_3 = \frac{1,85}{3} \cdot \varphi_6 \quad (3)$$

Gleichung (3) optimiert den Arbeitsbereich.

Die obigen Gleichungen optimieren bei minimalem Ölverbrauch die Bewegungsabläufe der Gelenksteuerung. Die Berechnung basiert auf dem Prinzip der inversen Kinematik, d. h. dass für eine gegebene Düsenbewegung ein Bewegungsmuster für jedes individuelle Gelenk berechnet wird. Infolge der komplexen kinematischen Struktur des Roboters existiert keine geschlossene Lösung der inversen Kinematik. Die Gelenkwinkel werden deshalb numerisch nach der Methode von Newton-Raphson berechnet.

Der Düsenführer steuert die Düsenbewegung direkt mit einem 6-D-Joystick (**Bild 6**), was, verglichen mit der herkömmlichen Steuerung von Manipulatoren, eine große Arbeitserleichterung bedeutet. Der 6-D-Joystick ist ein großer Griff mit integriertem Totmannschalter [18], [19], [20]. Der neue Roboter eröffnet die Möglichkeit, aus drei Spritzmodi zu wählen: vollautomatisch, halbautomatisch oder manuell. Die Vorteile sind wie folgt:

- Sehr einfache, ergonomische Steuerung,
- Reduzierte Anlernzeit,
- Spritzbetonqualität und Spritzleistung sind unabhängig von der Qualifikation des Düsenführers (vollautomatischer Modus),
- Profilvermessung und Spritzbetonauftrag mit der selben Maschine,
- Möglichkeit der Schichtstärkenerfassung,
- Zeiteinsparung bei Installation, Spritzen und Profilkontrolle.



Bild 6. Fernsteuerung
Fig. 6. Remote control with 6-D-joystick

2.3.1 Manuelles Spritzen

Der Düsenführer benutzt den Roboter als Manipulator, um Spritzbeton manuell zu applizieren. Der Betonauftrag wird durch die Applikationsprozesssteuerung nicht unterstützt, aber die Bewegungen des Spritzarms (Ausleger, Lanze, Düse) werden durch das mechanische Kontrollsystem gesteuert. Das manuelle Spritzen ist für sehr unregelmäßige Verhältnisse gedacht, wo eine Bewegungsbeschreibung aus Gründen der Komplexität oder der Ökonomie zu aufwendig wäre, um ins Steuerungsprogramm eingebaut zu werden. Solche Verhältnisse könnten typischerweise sein:

- Extremes lokales Überprofil,
- Lokales Überdecken von Ankerplatten oder Drainagehalbschalen,
- Schnelle Reparaturarbeiten mit begrenzter Ausdehnung,
- Verfüllen von Hohlräumen, verursacht durch Steinfall.

Nach der Positionierung der Maschine arbeitet der Düsenführer mit dem 6-D-Joystick. Er steuert lediglich die Bewegungen der Düse und braucht sich nicht um die einzelnen Gelenkbewegungen zu kümmern. Alle Gelenkbewegungen sind durch das mechanische Steuerungssystem prozessgesteuert.

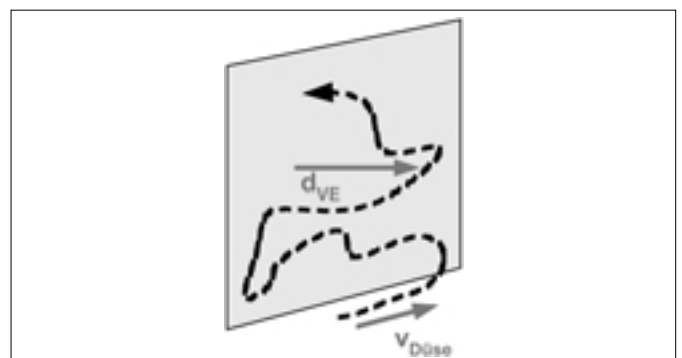


Bild 7. Manueller Spritzmodus
Fig. 7. Manual spraying mode

Mit dem 6-D-Joystick werden gesteuert (**Bild 7**):

- Düsenwinkel zur Felsoberfläche,
- Bahnführung und Geschwindigkeit v_D der Düsenführung,
- Spritzdistanz d_{VE} (Düsen spitze – Fels).

2.3.2 Halbautomatisches Spritzen

Der Benutzer hat die Freiheit der Bahnführung der Düse. Alle anderen Funktionen des Roboters sind durch die Applikationsprozesssteuerung und die mechanische Prozesssteuerung kontrolliert. Der halbautomatische Modus ist ein optionaler Modus, falls weder der manuelle noch der vollautomatische Modus ökonomisch oder technisch sinnvoll einsetzbar ist. Der Unterschied zur manuellen Applikation ist, dass die Applikationsprozesssteuerung eine virtuelle Parallelebene zur durch das Lasermesssystem vermessenen Felsoberfläche generiert. Die Düsen Spitze wird in der Parallelebene, deren Abstand zur Felsoberfläche die Spritzdistanz ist, geführt und automatisch immer rechtwinklig zur Felsoberfläche ausgerichtet. Die Bahnführung in dieser virtuellen Ebene wird durch den Düsenführer mit dem 6-D-Joystick manuell ausgeführt. Der Ablauf des Applikationsprozesses ist wie folgt: Um dem Applikationssteuerungssystem die erforderlichen Daten bereitzustellen, muss das Tunnelprofil vermessen werden. Dazu markiert der Düsenführer den zu sichernden Abschnitt mit dem Lasermesssystem. Die Steuerung berechnet aus der automatisch gemessenen Tunnelgeometrie eine virtuelle Ebene, kongruent zur vermessenen Felsoberfläche in der Spritzdistanz d_{VE} . Die Düsen Spitze wird in und normal zu dieser Ebene geführt. Die Spritzdistanz d_{VE} (Distanz virtuelle Ebene zur Felsoberfläche) muss vom Benutzer angegeben werden. Die Führung der Düsen Spitze erfolgt manuell mit dem 6-D-Joystick durch den Düsenführer.

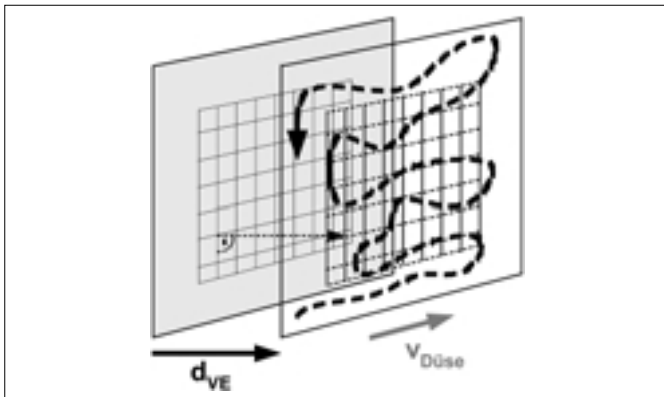


Bild 8. Halbautomatischer Modus
Fig. 8. Semi-automated mode

Mit dem 6-D-Joystick werden gesteuert (**Bild 8**):

- Bahnführung der Düse in der virtuellen Ebene,
- Geschwindigkeit v_D der Düsenführung.

Der halbautomatische Modus verhindert durch die optimierte Düsensteuerung erhöhten Rückprall speziell in Bereichen, welche schlecht einsehbar oder über Kopf weit weg vom Düsenführer sind, und ermöglicht eine weitgehend gleichmäßige Spritzbeton-Applikationsqualität. Dieser Modus bietet die volle Freiheit des manuellen Auftrages von Spritzbeton bezüglich Schichtstärke und Oberflächenbeschaffenheit, doch dem Düsenführer obliegt die Kontrolle der aufgebrauchten Schichtstärke.

2.3.3 Vollautomatisches Spritzen

Im Vergleich zu den anderen beiden Modi muss das Robotersystem die Erfahrung des Düsenführers und Überwachung des Spritzprozesses übernehmen. Der Roboter übernimmt die volle Kontrolle des Applikationsprozesses. Dieser Modus wird für folgende Bedingungen entwickelt:

- Schonend gesprengter Ausbruch,
- Gefräste Querschnitte mittels TBM.

Die Vermessung erfolgt wie im halbautomatischen Modus durch die Definition des Start- und Endpunktes der automatischen Applikation. Das Applikationssteuerungsprogramm berechnet, von der Eingabe des Benutzers (Spritzdistanz d_{VE} , Schichtstärke, Spritzbetonpumpenförderleistung) abhängig, aus dem vermessenen Tunnelprofil und dem theoretischen Profil die erforderlichen Daten der Applikationssteuerung. Die Düsenführung ist durch die Applikationsprozesssteuerung übernommen, welche die Düse automatisch normal zur Felsoberfläche, in Bahnkurven mit Bahnabstand d und mit der Geschwindigkeit v_D führt, um die verlangte Schichtstärke aufzubringen oder das Sollprofil zu erstellen (**Bild 9**). Der Benutzer muss lediglich die erforderliche Schichtstärke und Betonförderleistung angeben.

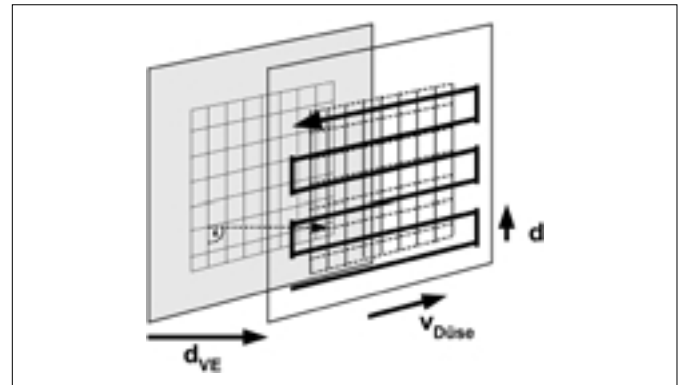


Bild 9. Vollautomatischer Modus
Fig. 9. Fully automated mode

Die Bahnführung ist im Computerprogramm der Applikationsprozesssteuerung beschrieben. Der Bahnabstand wird auf der Basis der Versuchsdaten berechnet und später beschrieben. Der 6-D-Joystick ist blockiert, doch muss aus Sicherheitsgründen der Totmannschalter gedrückt werden. Dieser Betriebsmodus gewährleistet die größtmögliche Leistung und Applikationsqualität.

2.3.4 Steuerungskomponenten

Alle Komponenten des Roboters sind mit einem im Steuerkasten eingebauten Rechner über Busverbindungen verknüpft. Im Rechner laufen alle Daten der einzelnen Module zusammen. Je nach Aufgabe wird ein Bewegungsmuster generiert und optimiert. Die Gelenke werden so gesteuert, dass keines am Limit des Bewegungsbereiches operiert. Durch die Minimierung der erforderlichen Ölmenge können die Bewegungen beschleunigt werden. Die Module des Roboters sind:

- Mechanische Struktur: Ausleger, Lanze und Düse, Sensoren für die Bewegungssteuerung,
- Mechanische Prozesssteuerung: Computer (Industriestandard) mit Flash-EPROM Memory und erforderlichen Schnittstellen für Fernanalyse und Service via Internet, Fernsteuerung mit 6-D-Joystick, Touch-Screen und Visualisierungsfunktion,
- Applikationsprozess: Lasermesssystem, Applikationsprozesssteuerungsprogramm.

2.3.5 Profilvermessung im halb- und vollautomatischen Modus

In einem ersten Schritt muss die berücksichtigte Felsoberfläche vermessen werden. Die Vermessung erfolgt mit einem Lasermesssystem. Das Lasergerät befindet sich auf der Lanze des Manipulators zwischen den Gelenken 6 und 7. Die mechanische Struktur von Ausleger und Lanze limitiert den Messbereich entlang der Tunnel-

achse auf 3 Meter. Das Messprinzip ist eine reflektorlose Laufzeitmessung im Infrarotbereich. Das Messraster wird durch den Benutzer definiert. Je mehr Messpunkte in die Auswertung übernommen werden, desto genauer wird die effektive Felsoberfläche abgebildet. Das Kriterium für die Wahl der Abstände der Messpunkte ist die Ebenheit der Felsoberfläche. Im vollautomatischen Modus wird die Vermessung zweimal durchgeführt, vor und nach der Spritzbetonapplikation. Der Computer berechnet die erreichte Schichtstärke in jedem Punkt durch den Vergleich der beiden Messungen.

Mit der Anbindung der Vermessung an das Globale Tunnelkoordinatensystem (Bei jeder Stationierung wird das theoretische Profil dem entsprechenden gemessenen Profil zugewiesen) wird die Sollprofilkontrolle in Zukunft wie folgt erfolgen:

- Vermessen des Ausbruchprofils durch das Lasermesssystem,
- Eingabe der theoretischen Profile in den Steuerungscomputer,
- Berechnung der erforderlichen Schichtstärke aus dem gemessenen Ausbruchprofil und dem theoretischen Tunnelprofil in jedem Messpunkt durch das Applikationsprozesssteuerungsprogramm,
- Berechnung der Düsenführungsgeschwindigkeit zwischen den Messpunkten aus der interpolierten Schichtstärke entlang des Messrasters durch das Applikationsprozesssteuerungsprogramm (die Geschwindigkeit ist eine Funktion der Förderleistung und der Schichtstärke).

Die Spritzbetonschichtstärke wird durch die Haftzugfestigkeit und die Beschleunigerdosierung limitiert. Übersteigt die berechnete Schichtstärke das Limit, führt der Roboter die Applikation in mehreren Arbeitsgängen aus. In den anderen Modi muss die Schichtstärke manuell überprüft werden (nicht zerstörungslos!).

2.3.6 Applikationssteuerung im halb- und vollautomatischen Modus
Die Berechnung der Bewegungen basiert auf dem Prinzip der inversen Kinematik. Für einen gegebenen Weg der Spritzdüse entlang der Felsoberfläche wird die Ansteuerung der einzelnen Gelenke definiert. Mit der Definition von Gleichungen für ausgewählte Gelenke können die Redundanzen der kinematischen Freiheitsgrade eliminiert werden [21], [22]. Die Bedienung ist sehr einfach. Der Benutzer wird durch zweifarbige Leuchttasten durch den selektierten Betriebsmodus geführt (grüne Tasten können angewählt werden, rote Tasten bedeuten „Operation in Ausführung“ und nicht leuchtende Tasten bedeuten „Funktion nicht verfügbar“). Das grundlegende Prinzip der Automatisierung ist die Berechnung einer virtuellen polygonalen 3-D-Ebene parallel, in der Distanz d_{VE} , zur zuvor vermessenen Felsoberfläche. Je nach gewähltem Modus müssen einige Parameter über Touch-Screen ins System eingegeben werden (**Bild 10**).

Die spezifizierten Funktionen werden unter Reduktion der Handlungsfreiheit des Düsenführers durch die Applikationsprozesssteuerung übernommen: volle Roboterkontrolle im vollautomatischen Modus, keine Applikationsprozesssteuerung im manuellen Modus [7], [23]. Die nicht spezifizierten Funktionen werden manuell mit dem 6-D-Joystick gesteuert.

Die Fernsteuerung mit 6-D-Joystick ermöglicht die benutzerfreundliche Handhabung.

3 Systemintelligenz für das vollautomatische Spritzen

Waren die Kenntnisse einiger unabhängiger Beziehungen der Applikationsparameter ausreichend für das Spritzen von Hand oder mit Manipulator, so sind sie es für das vollautomatische Spritzen mit dem

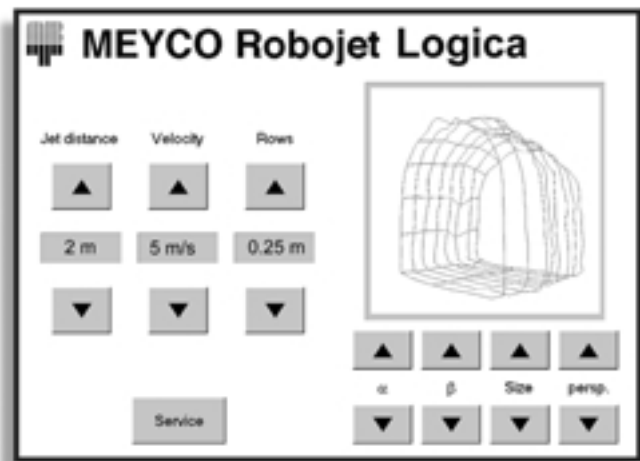


Bild 10. Touch-Screen und Tunnelvisualisierung
Fig. 10. Touch screen

Roboter nicht. Die verschiedenen Einflüsse müssen quantifiziert und bewertet werden, um gegenseitig in Beziehung gesetzt werden zu können. Alle abhängigen und unabhängigen Faktoren müssen in das Applikationsprozesssteuerungsprogramm implementiert werden. Für die Forschung von größter Bedeutung ist die Übertragbarkeit der Versuche auf Baustellenbedingungen, weil nur diese Forderung garantieren kann, dass die Resultate in die Applikationsprozesssteuerung eingebaut werden können. Weil viele Randbedingungen auf der Baustelle nicht beeinflusst werden können, sollen die Resultate nicht auf zwei Stellen nach dem Komma genau genommen werden. Viel wichtiger ist die Interaktion der Material- und Applikationsparameter.

3.1 Ziele

Spritzbetonapplikation durch den Düsenführer beinhaltet die visuelle Felsbeurteilung und die Kenntnis der Auftragssystematik. Für den vollautomatischen Spritzbetonauftrag muss die Geschicklichkeit des Düsenführers in „künstliche Applikationsintelligenz“ überführt werden. Dies bedeutet, dass alle wichtigen Parameter des Applikationsprozesses analysiert und in ihrer Abhängigkeit optimiert werden müssen, um im Applikationsprozesssteuerungsprogramm beschrieben zu werden. Dies wird große Spritzleistungen ermöglichen, in einer definierten Schichtstärke oder in variablen Schichten, um unregelmäßig gesprengte Abschlüsse auszugleichen, um das Sollprofil zu erreichen, in hoher Qualität, mit großer Ebenheit und einem Minimum von Rückprall. Mit der Erfüllung dieser Forderungen können die Kosten nachhaltig gesenkt werden. Die Basis der Problemlösung ist die Erfassung der Spritzbetonverteilung durch den Spritzstrahl in einzelnen Streifen und deren Überlagerung.

Der Rückprallanteil und die Ebenheit der Spritzbetonoberfläche hängen von der Beschleunigung des Betons durch die Druckluft an der Düse, der Spritzdistanz und der Beschleunigerdosierung ab. Die Beziehung zwischen der Betonfördermenge und dem Luftdruck muss so beschrieben werden, dass die Regulierung der Betonförderung und der Luftmenge in Zukunft automatisch durch das System übernommen werden kann [24].

3.2 Forschungsmethodik

Für die vollautomatische Applikation von Spritzbeton ist ein gleichmäßiges Gefüge der Spritzbetonschicht in Bezug auf Erscheinungsbild, Druckfestigkeit und Wasserdurchlässigkeit sehr wesentlich. Für

die Applikationsprozesssteuerung wurden drei Typen von Felsoberflächen definiert: glatte Oberflächen (gefräste Querschnitte mit TBM), raue Oberflächen (Sprengausbruch mit Überprofil) und Oberflächen mit Netz- und Bogeneinbau.

Die Forschung an der ETH Zürich gliedert sich in 5 Phasen:

- Vorversuche (nur glatte Oberflächen),
- Basisversuche,
- Spezifische Applikationsversuche,
- Entwurf von Kalibrierungsgrößen,
- Überprüfung der Laborexperimente auf der Baustelle.

Mit den Vorversuchen wurden die Funktionsfähigkeit des Roboters überprüft und die Grunddaten erhoben. Es mussten einige Änderungen am Roboter vorgenommen werden (mechanisches System, Software und Lasermesssystem) und das Versuchsprogramm musste auf die ersten Erkenntnisse abgestimmt werden.

Mit den Basisversuchen wurden die Daten der Spritzbetonverteilung in einzelnen Spritzbahnen erfasst. Durch die Veränderung der Haupteinflussparameter der Basisversuche wurden die Randbedingungen für einen sinnvollen Praxiseinsatz des Roboters (vollautomatischer Modus) ermittelt.

In den spezifischen Applikationsversuchen wurden die besten Parameterkombinationen der Basisversuche variiert und der Einfluss von Betonförderleistung und Luftdruck erfasst. Auf den Versuchen aufbauend wurde eine Hypothese für den vollflächigen Spritzbetonauftrag entworfen. Anhand einer Simulation konnte die Hypothese des vollflächigen Spritzbetonauftrages unter Laborbedingungen bestätigt werden. Das Stadium der Laborversuche ist abgeschlossen. Die spezifischen Applikationsversuche werden zur Zeit mit laufenden Baustellenversuchen vervollständigt. In der Phase 4 wird ein Kalibrierungsversuch entwickelt (Stand der Arbeit), um die Resultate der Basisversuche und spezifischen Applikationsversuche auf mögliche Betonmischungen umzulegen. In der letzten Phase wird die Praxis-tauglichkeit auf der Baustelle überprüft.

Die Forschung muss eine Vielzahl von Parameterkombinationen, Spritzdistanz, Düsenführungsgeschwindigkeit, Düseneigenbewegung, Betonfördermenge sowie Luftdruck untersuchen. Anders als beim händischen Spritzen können beim vollautomatischen Spritzbetonauftrag nur ausgewählte Parametereinstellungen in die Applikationsprozesssteuerung implementiert werden. Der Grund ist, dass der Spritzstrahl, wenn er einmal aus dem applizierten Bereich hinaus gefahren ist, diesen im selben Arbeitsgang nicht nochmals bestreichen kann, d. h. die Oberflächenebenheit muss definitiv sein. Die Spritzbetonverteilung einer Spritzbahn ist die Grundlage für den vollflächigen Spritzbetonauftrag. Um eine zusammenhängende Fläche spritzen zu können, muss die Bahnführung aus der Betonverteilung einer Spritzbahn entwickelt werden. Von der verlangten Schichtstärke abhängig müssen die Spritzbahnen entsprechend überlagert werden. Der Bahnabstand der Spritzbahnen wird dazu durch eine Evaluationsfunktion ermittelt. Das Ausführungsprogramm mit der entwickelten Applikationsintelligenz (Eingabe ist nur die Schichtstärke) berechnet die Betonförderleistung, den Luftdruck an der Düse und die Düsenführungsparameter Bahnabstand, Geschwindigkeit, Rotation und Spritzdistanz.

Die Komplexität von rauen Oberflächen und solchen mit Stahleinbau erfordert die Definition von verschiedenen Spritzbereichen, z. B. des Übergangsbereichs zwischen angrenzenden Spritzfeldern, oder das Hinterfüllen von Stahleinbau (Verhinderung von Spritzschatten). Die systematische Spritzbetonapplikation dieser Bereiche wird in den Phasen 3 bis 5 untersucht.

3.3 Versuche

Der Versuchsaufbau muss die Wiederholbarkeit der Versuche gewährleisten. Dies erfolgt durch Kontrolle des Frischbetons, den Einsatz des Roboters im halbautomatischen Modus und die Vermessung ab Fixpunkt für identische Messungen in allen Experimenten [25]. Die Versuche wurden mit dem folgenden Förder- und Applikationssystem ausgeführt:

- MEYCO-Robojet, Meyco Suprema 0–20 m³/h, Standardnassspritzdüse 65/40 und 80/40,
- Doppelte Luftbeaufschlagung 2 x 1½", Beschleunigerzugabe an der Düse ¾", Dichtstromförderung 100/65 mm und 100/80 mm,
- Mix Design: CEM I 42,5 450 kg/m³ (Normo 4) [26], Zuschläge 0/8 mm 1736 kg/m³, Delvocrete Stabilisator 1,1 %, Rheobuild T3 Verflüssiger 1,1 %,
 - Eigenschaften: W/Z-Wert ~ 0,47, Ausbreitmaß ~ 50 cm [27], [28].

Es wurden mehrere Versuchsserien mit den folgenden Einstellungen gefahren: Spritzdistanz d_{VE} (1,0 m, 1,5 m, 2,0 m), Düsenführungsgeschwindigkeit v_D (10 cm/s, 15 cm/s, 20 cm/s) und Düsenrotation R_D (fix, 1 U/s, 2 U/s). Diese Parameter wurden in allen möglichen Variationen kombiniert. Die Betonfördermenge wurde konstant bei 10 m³/h gehalten. Die Versuche ohne Düsenrotation wurden infolge ungenügender Gleichmäßigkeit im Spritzbetonauftrag aus dem Versuchsprogramm gestrichen. Der Versuchsablauf war wie folgt: Laserpositionierung, Frischbetonkontrolle, Spritzbetonauftrag mit konstantem Förderstrom, Vermessung der Spritzbetonverteilung, Wiegen des Rückpralls und der haftenden Betonmenge, Entfernen des Betons und Vorbereitung für den nächsten Versuch.

3.3.1 Basisversuche

Die Basisversuche wurden auf einer vertikalen Versuchswand mit glatter Oberfläche ausgeführt. Der Spritzbeton wurde in einzelnen Spritzbahnen aufgebracht. Die Spritzbetonverteilung wurde durch ein Lasermesssystem in jedem Streifen mit 5 Parallelprofilen erfasst. Die Vermessung erfolgte für alle Versuche vom selben Fixpunkt aus. Um die Pulsation der Betonförderung zu eliminieren und um einen gleichmäßigen Auftrag zu erhalten, wurde zu Versuchsbeginn und -ende in eine Box gespritzt. Neben der Vermessung der Spritzbahnen wurde der Rückprall erfasst. Die Spritzbetonverteilung der Spritzbahnen variierte für Beschleunigerdosierungen von 4–8 % nicht. Aus ausführungstechnischen Gründen wurde die Beschleunigerdosierung mit 4 % festgelegt.

3.3.2 Spezifische Applikation

Die Parametereinstellungen mit dem höchsten Zielerreichungsgrad aus der Phase 2 wurden für weitere Versuche mit veränderter Betonförderleistung von 15 und 20 m³/h selektioniert.

Mit der erhöhten Fördermenge musste, um Verstopfungen in der Zuleitung und Düse vorzubeugen, der Zementgehalt der Betonmischung erhöht werden (CEM I 42,5 500 kg/m³). Neben dem Erfassen der Betonverteilung analog den Basisversuchen wurde die theoretische vollflächige Applikation mit Labor- und Baustellenversuchen überprüft.

3.4 Resultate der Basisexperimente

Um einen Eindruck eines Versuches zu vermitteln (Betonförderleistung 10 m³/h, Spritzdistanz $d_{VE} = 1,5$ m; Düsenführungsgeschwindigkeit $v_D = 15$ cm/s; Düsenrotation $R_D = 2$ U/s) ist die Spritzbetonverteilung von 4 Spritzbahnen, vermessen in je 5 Parallelprofilen, in der überhöhten Graphik (**Bild 11**) dargestellt. Auf der y-

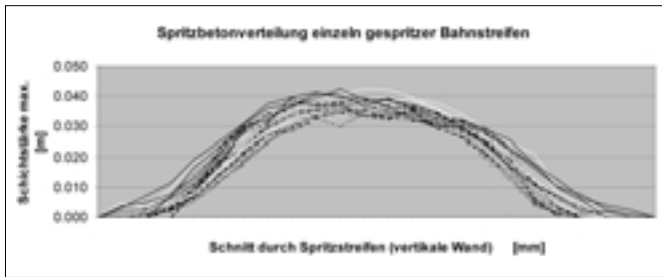


Bild 11. Betonverteilung eines Spritzstreifens
Fig. 11. Concrete cross distribution curves sprayed in single strips

Achse entspricht eine Markierung 10 mm, auf der x-Achse 50 mm. Die maximale Schichtstärke dieses Spritzstreifens beträgt 3,5 bis 4 cm. Die Ausdehnung an der Wand ist etwa 1,10 m. Die maximale Korngröße von 8 mm ergibt eine Rauigkeit der Spritzbetonoberfläche von etwa 10 mm. Mit erhöhter Beschleunigerdosierung verbessert sich die Rauigkeit.

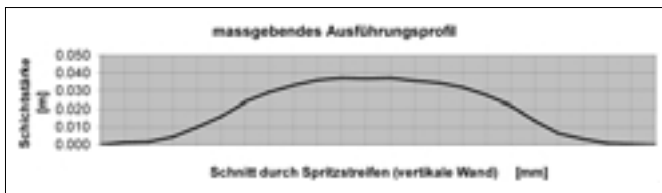


Bild 12. Maßgebendes Profil
Fig. 12. Design profile

Das maßgebende Profil (**Bild 12**), das als Standardspritzbetonverteilung im Programm der Applikationsprozesssteuerung implementiert ist, wird aus der Kurvenschar der Spritzstreifenvermessung gewonnen. Es zeigt sich, dass die Gravitation nur einen geringen Einfluss hat. Von grundlegender Bedeutung ist, dass die Spritzbetonverteilung entlang eines Spritzstreifens konstant ist. Deshalb muss bei einer roboterisierten Applikation eine Spritzdistanz d_{VE} von 1,5 bis 2,0 Meter eingehalten werden. Bei einer Spritzdistanz von 2 m sind Düsenführungsgeschwindigkeiten von v_D von 10–20 cm/s und eine Düsenrotation R_D von 1–2 U/s möglich. Bei einer Spritzdistanz von 1,50 m muss die Düsenführungsgeschwindigkeit bei 10 cm/s und eine Düsenrotation von 2 U/s gewählt werden. Diese Einstellungen ergeben eine sehr geringe Standardabweichung des maßgebenden Profils.

3.5 Entwurf der Systemintelligenz

Die Untersuchung der mäanderweisen Bahnführung der Spritzdüse hat gezeigt, dass die Bahnrichtung (horizontal, vertikal oder jede beliebige Ausrichtung dazwischen) keinen Einfluss auf die Betonqualität bezüglich Homogenität und Druckfestigkeit hat. Das Rückprallverhalten zeigt keine signifikanten Abweichungen. Diese Untersuchungen wurden im Trockenspritzverfahren mit einem modifizierten Industrieroboter durchgeführt [5].

Um der Spritzbetonablösung vom Fels vorzubeugen, muss der Spritzbetonauftrag von unten nach oben erfolgen. Die Bahnplanung (horizontal oder vertikal) wird technisch durch die Kinematik von Ausleger und Lanze bestimmt. Infolge der Lanzenausrichtung ist die horizontale mäanderweise Bahnführung für das untersuchte System am optimalsten.

3.5.1 Hypothese

Basierend auf dem maßgebenden Profil, das die Grundlage für den systematischen Spritzbetonauftrag bildet, werden die besten Applikationsparameter mit einer algorithmischen Simulation für den vollflächigen Spritzbetonauftrag gefiltert. Der Spritzbetonauftrag auf einer ebenen, vertikalen Experimentierwand ist recht unterschiedlich zur Spritzbetonapplikation auf der Baustelle, weil Löcher und Überzähne die Betonverteilung beeinflussen. In einem ersten Schritt wird die Spritzbetonapplikation für ebene Oberflächen optimiert. Der Auftrag erfolgt in parallelen, horizontalen Bahnkurven vom Fuße der Parameter bis zum Übergang in die Kalotte. Die Einstellung der Parameterkombination bleibt während der Applikation konstant. Das maßgebende Profil wird in parallelen horizontalen Bahnkurven überlagert, um die definitive Schichtstärke aufzubauen.

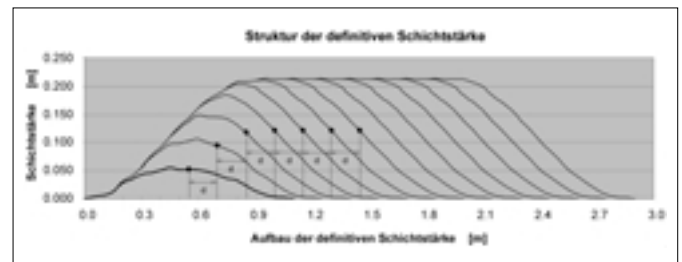


Bild 13. Schichtaufbau
Fig. 13. Structure of final layer thickness

Das in **Bild 13** dargestellte maßgebende Profil hat eine Ausdehnung von 95 cm und weist eine maximale Schichtstärke von 0,05 m auf. Mit einem Bahnabstand von $d = 15$ cm wird die Schichtstärke von 22 cm erreicht. Die Präzision der Bewegungen von Ausleger, Lanze und Düse begrenzen den Bahnabstand auf minimal 0,05 m, woraus bei einer Betonförderleistung von 20 m³/h eine theoretische maximale Schichtstärke von 0,80 m resultiert. In der Praxis werden die aufgetragenen Schichtstärken infolge ungenügender Haftzugfestigkeit geringer als 0,40 m sein. Um eine bestmögliche gleichmäßige Spritzbetonverteilung zu erhalten, ist das obere Limit der Bahnabstände im Allgemeinen gleich dem Kegeldurchmesser des Rotationswinkels des Düsenmittelpunktes auf der Spritzoberfläche zu setzen. Mit dem Standardrotationswinkel von φ_{Rot} von 4° resultiert ein Bahnabstand von max. 21 cm für eine Spritzdistanz von 1,50 m und 28 cm für 2,00 m.

3.5.2 Simulation

Die Versuchsdaten (maßgebendes Profil, Rückprall, Applikationsparameter, Wasserdurchlässigkeit, Druckfestigkeit, Luftdruck und Betoneigenschaften) sind in einer Datenbank zusammengefasst. Ein programmierter Algorithmus läuft durch die Datenbank, sucht nach der erforderlichen Parameterkombination und schlägt die optimierten Einstellungen für die Prozesssteuerung vor. Das einzige Qualitätskriterium, das vom Benutzer angegeben werden kann, ist die Ebenheit der definitiven Spritzbetonschicht. Die Ebenheit ist definiert durch die Differenz zwischen der maximalen und der reduzierten Schichtstärke (**Bild 14**), bezogen auf die Distanz d_m zweier angrenzender Maxima. Es wurden folgende 3 Typen von Ebenheit definiert

- Fein: $\Delta \leq 10$ mm
- Mittel: $\Delta \leq 20$ mm
- Rau: $\Delta \geq 20$ mm

mit:

$$\text{Ebenheit} = \frac{\Delta}{d_m}$$

$$\Delta = l_m - l_r$$

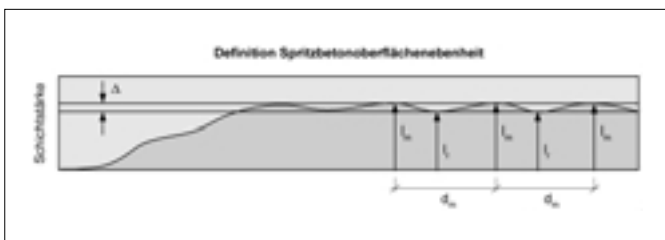


Bild 14. Definition Oberflächenebenheit
Fig. 14. Shotcrete application evenness

Mit einer algorithmischen Simulation des Spritzprozesses wurden die Einstellungen des Applikationsprozesses, die der Forderung einer feinen Oberflächenstruktur genügen, evaluiert. Der Zuwachs in der Schichtstärke wurde in Schritten von 0,01 m realisiert. Mit der Angabe der Ebenheit der Oberfläche, die zu erstellen ist (fein, mittel, rau), und der Gewichtung von Rückprall gegenüber Spritzzeit wird für die gewünschte Schichtstärke (**Bild 15**) die optimale Einstellung der Applikationsprozesssteuerungsparameter mit dem entsprechenden Bahnabstand ermittelt.

Die Simulation verschiedener Schichtstärken ist für eine ausgewählte Parametereinstellung (Betonfördermenge 10 m³/h, Spritzdistanz $d_{VE} = 1,0$ m, Düsenrotation $R_D = 1$ U/s, Düsenführungsgeschwindigkeit $v_D = 10$ cm/s) in **Bild 16** wiedergegeben.

Abhängig vom Bahnabstand (5–30 cm) und der oben beschriebenen Parameterkombination werden Schichtstärken von 25–5 cm erreicht. Die Qualität der Ebenheit der verschiedenen Oberflächen ist unterschiedlich. Die Parametereinstellung (Bild 16) für Schichtstärken geringer als 10 cm erfüllt die Forderung nach einer feinen Oberfläche nicht. Die Visualisierung der vollautomatischen Spritzbetonapplikation zeigt zwei Bereiche (**Bild 17**), den konstanten Bereich und den Übergangsbereich, in welchem die Schichtstärke zunimmt.

Der Übergangsbereich resultiert aus den ersten, sich teilweise überschneidenden Bahnkurven, bis die Schichtstärke wie verlangt konstant bleibt (die Behandlung dieses Übergangsbereiches wird im



Bild 16. Ebenheit verschiedener Schichtstärken
Fig. 16. Evenness of different layer thickness

nächsten Forschungsschritt analysiert). Die Ausdehnung des Übergangsbereiches hängt von der Schichtstärke ab und variiert zwischen 0,50 und 1,00 Meter.

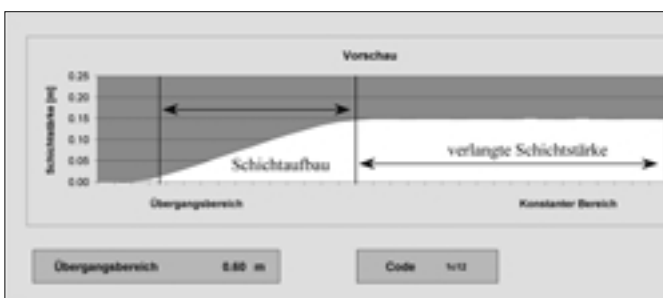


Bild 17. Darstellung Parametereinstellung
Fig. 17. Visualization of output parameter set

3.6 Resultate Spezifische Applikation

Die Parameterkombinationen, welche in der Simulation eine feine Oberfläche ergaben, wurden für weitere Versuche mit Betonförderleistungen von 15 und 20 m³/h verwendet (**Bild 18 und 19**). Die maximalen Schichtstärken der maßgebenden Profile betragen, je nach gewählter Parameterkombination und Betonförderleistung, 0,02 bis 0,07 m. **Bild 20** zeigt einen Verifikationsversuch. Bezüglich des theoretischen Schichtaufbaus (konstanter Bereich) konnten u. a. die folgenden Erkenntnisse gewonnen werden.

Spritzbetonauftrag		Prozesssteuerung	
Ebenheit	fein	Wählen Sie bitte die folgenden Einstellungen	
Gewichtung der Zeit	5 [%]	Bahnabstand d	0.16 [m]
Gewichtung des RP (100%-1%)	95 [%]	Erwarteter Rückprall	11 [%]
Schichtstärke	0.15 [m]	Systemeinstellungen	
		a Düse	1.5 [m]
		v Düse	10 [cm/s]
		R Düse	2 [U/s]

Bild 15. Eingabemaske Prozesssteuerung
Fig. 15. Input mask: Evaluation Process Control

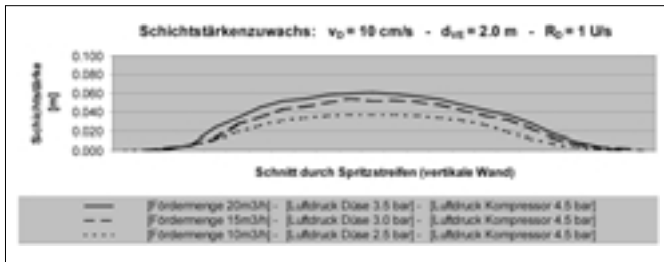


Bild 18. Schichtstärkenzuwachs ($R_D = 1$ U/s) in Abhängigkeit von Betonfördermenge und Luftdruck
Fig. 18. Increase of design profile ($R_{nozzle} = 1$ RPS) in dependency on concrete capacity and air pressure

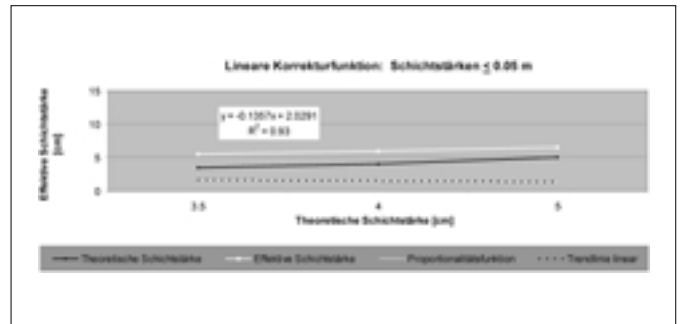


Bild 21. Korrekturfunktion für Spritzbetonschichtstärken ($\leq 0,05$ m)
Fig. 21. Correction function (layer thickness $\leq 0,05$ m)

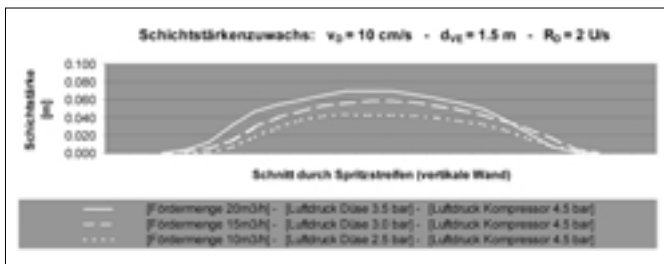


Bild 19. Schichtstärkenzuwachs ($R_D = 2$ U/s) in Abhängigkeit von Betonfördermenge und Luftdruck
Fig. 19. Increase of design profile ($R_{nozzle} = 2$ RPS) in dependency on concrete capacity and air pressure

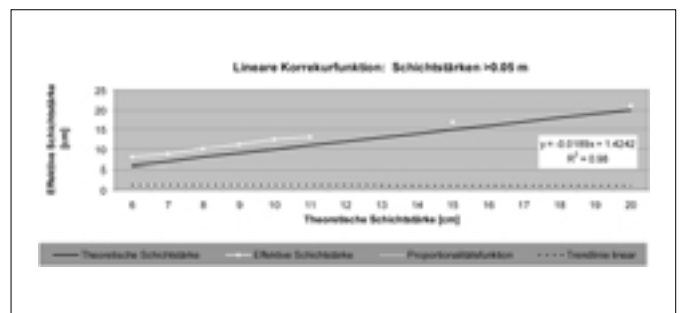


Bild 22. Korrekturfunktion für Spritzbetonschichtstärken ($> 0,05$ m)
Fig. 22. Correction function (layer thickness $> 0,05$ m)

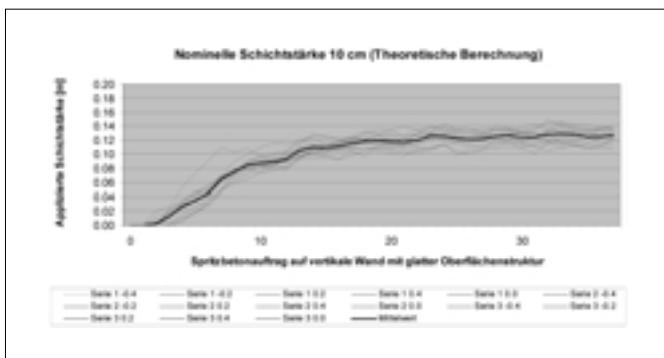


Bild 20. Überprüfung der Schichtstärke in einem Tunnel
Fig. 20. Experimental layer thickness in a tunnel

- Schuppige Oberflächenstruktur (Die Struktur hängt u. a. von der Beschleunigerdosierung ab. Mit zunehmender Dosierung bis 8 % kann die Gleichmäßigkeit verbessert werden).
- Größere Schichtstärke.
- Die Standardabweichung der definitiven Schichtstärke beträgt maximal das 1,2fache der maximalen Korngröße.

Die Versuche haben gezeigt, dass sich die Schichtstärke des maßgebenden Profils vergrößert, wenn auf abbindenden Spritzbeton appliziert wird anstatt auf Fels. Infolge der Überlagerung der Spritzbahnen, um die verlangte Schichtstärke zu erhalten, nimmt der Rückprall pro Bahnstreifen ab. Der Zuwachs ist proportional zur Gradienten des maßgebenden Profils (Applikation auf Fels). Der quantifizierte Zuwachs von 0,001 bis 0,003 m ist umgekehrt proportional zur Schichtstärke des maßgebenden Profils. Die effektive Schichtstärke ist deshalb in Bezug zur theoretisch berechneten erhöht. Dieses Phänomen wurde in verschiedenen Versuchen erfasst und mit den folgenden Korrekturfunktionen quantifiziert (**Bild 21** und **22**):

$y = -0,1357x + 2,0291$ ($R^2 = 0,93$) für Schichtstärken bis 0,05 m und
 $y = -0,0189x + 1,4242$ ($R^2 = 0,98$) für Schichtstärken größer 0,05 m

Die empfohlenen Parameterkombinationen der Simulation wurden für Schichtstärken von 0,05 bis 0,11 m, 0,15 m und 0,20 m unter Laborbedingungen verifiziert. Die Standardabweichung der gemessenen Spritzbetonschichtstärken war generell geringer als ± 1 cm.

3.7 Zusammenfassung der Laborexperimente

Sämtliche Applikationen der Laborversuche wurden im halb- oder vollautomatischen Modus des MEYCO-Robojet ausgeführt. Die Spritzdistanz d_{VE} , die Düsenführungsgeschwindigkeit v_D und die vertikale Ausrichtung der Düse zur Felsoberfläche wurden durch das Applikationsprozesssystem gesteuert und jederzeit präzise eingehalten. Neben der Erfassung der Ebenheit und des Rückpralls wurden die Druckfestigkeit nach 7 und 28 Tagen und die Wasserdurchlässigkeit untersucht. Die Wasserdurchlässigkeit ist ein gutes Kriterium, um das Haftvermögen zwischen den einzelnen Schichten und die Separation im Spritzbeton zu überprüfen. Die Wasserdurchlässigkeit korreliert mit der Druckfestigkeit. Der Zuwachs der Druckfestigkeit zwischen dem 7. und 28. Tag ist für die untersuchten Parametereinstellungen etwa gleich. Die Laborversuche haben die folgenden Resultate geliefert:

Düsenrotation von 1–2 U/s reduzieren die Effekte der Pulsation und ergeben deshalb eine gleichmäßigere Spritzbetonoberfläche. Mit Düsenführungsgeschwindigkeiten ≤ 20 cm/s verbessert sich die Gleichmäßigkeit entlang den Spritzbahnen. Mit zunehmender Spritzdistanz (1,5–2,0 m) verbessert sich die Gleichmäßigkeit des Spritzbildes. Für zunehmende Düsenabstände von 1,5 m zu 2,0 m verändert sich der Rückprall bei entsprechender Betonfördermenge wie folgt: er vergrößert sich stark für 10 m³/h, nimmt wenig zu für 15 m³/h und nimmt für 20 m³/h ab. Die Druckfestigkeit ist für alle Parame-

terkombinationen (feine Oberfläche) bei Spritzdistanzen von 2,0 m größer als bei 1,5 m. Diese Trends haben sich abhängig vom Luftdruck an der Düse (2,25, 2,75, 3,5 bar), mehr oder weniger ausgeprägt gezeigt. Der Luftdruck am Ausgang des Kompressors war konstant bei 4,5 bar. Das zeigt, dass nicht nur der Luftverbrauch, sondern viel mehr der Luftdruck an der Düse der maßgebende Faktor für die Qualität ist.

3.8 Applikation auf der Baustelle

Unter der Berücksichtigung der Korrekturfunktionen konnten die Laborexperimente zur Baustellenapplikation transferiert werden. Der Spritzbetonauftrag erfolgte mit Beschleunigerdosierungen von 4, 6 und 8 %. Der Spritzbeton wurde sowohl auf Spritzbeton (versiegelter Fels) wie auch auf Fels aufgetragen.

Bei jeder Spritzbetonapplikation wird das Ausbruchprofil durch den Spritzbeton ausgeglichen, Löcher werden gefüllt und Spitzen weniger überdeckt [15]. Die mehrmalige Überlagerung eines maßgebenden Profils hat einen ausgleichenden Effekt, wodurch die Gleichmäßigkeit der definitiven Spritzbetonoberfläche in gewissen Grenzen

der Unebenheit selbstregulierend wird. Mit den folgenden Beschleunigerdosierungen konnten Ablösungen und Niederbrüche aus der Kalotte vermieden werden: 4 % für Schichtstärken von 0,05 m auf versiegeltem Fels, 6 % für Schichtstärken von 0,12 m auf versiegeltem Fels und 0,08 m auf Fels, 8 % für Schichtstärken von 0,15 m auf versiegeltem Fels und 0,12 m auf Fels. Der Spritzbetonauftrag erfolgte vom Parament zum Kalottenscheitel (schonend gesprengter Ausbruch). In jedem dieser Versuchsfelder wurden mehrere Profile gemessen. In **Bild 23** ist die abgewinkelte Länge vom Parament bis zur Kalotte (3 gemessene Profile) dargestellt. Die verlangte theoretische Schichtstärke ist 0,10 m. Gemäß [14] ist bei der Felssicherung mit Spritzbeton für Schichtstärken ≤ 15 cm die Toleranz der Ist-Schichtstärke $-0,01$ m.

Mit der aus der Simulation gewonnenen und mit den Korrekturfunktionen berichtigten Parameterkombinationen erreicht der vollautomatische Spritzbetonauftrag die verlangte Spritzbetonschale von 0,10 m Stärke sehr gut. Der Mittelwert der erreichten Schichtstärke ist \geq der tolerierten minimalen Schichtstärke von 0,09 m. Einige wenige Messpunkte, auf Spitzen gemessen, erreichen das Toleranzlimit nicht. Messpunkte über Vertiefungen, durch Steinfall verursacht, ergeben Schicht-

stärken von 0,11 bis 0,12 m. Die mänderrweise Applikation überdeckt Spitzen weniger und Löcher mehr. Um an jeder Stelle eines Profils die theoretische Schichtstärke garantieren zu können, müsste zuviel Spritzbeton aufgetragen werden. Das abgebildete Profil (**Bild 24**) zeigt die Situation im Detail lokal.

Das Ziel des vollautomatischen Spritzbetonauftrages (integrierte Qualitätskontrolle) ist, dass die aufgebrauchte Schichtstärke die Ist-Schichtstärkeltoleranz [14] nicht unterschreitet. Der vollautomatische Applikationsmodus garantiert die gleichmäßigste Schichtstärke.



Bild 23. Schichtstärkenkontrolle bei einem Baustellenversuch
Fig. 23. Layer control of fully automated shotcrete application

3.9 Empfehlungen für die Spritzbetonapplikation

Je geringer die Schichtstärke des maßgebenden Profils und je kleiner der Bahnabstand, desto besser wird die Ebenheit der Spritzbetonoberfläche. Um der Spritzbetonablösung (Hohlstellen) und der schuppigen Erscheinungsstruktur entgegenzuwirken, sollten die einzelnen Spritzbetonschichten 5–15 cm stark sein. Die folgenden Richtwerte von Applikationsparameterkombinationen sind bei einer Installation gemäß Abschnitt 3.3 und für Betonfördermengen von $10 \text{ m}^3/\text{h}$ zu verwenden (vgl. **Tabelle 1**):

Betonfördermengen von $15\text{--}20 \text{ m}^3/\text{h}$ sind hauptsächlich für das Vorspritzen (Verfüllen von Ritzen und Löchern) oder für Schichtstärken $> 0,20$ m geeignet. Mit einer erhöhten Beschleunigerdosierung wird die Ebenheit der Spritzbetonoberfläche besser, Dosierungen unter 5 bis 6 % sollten vermieden werden.

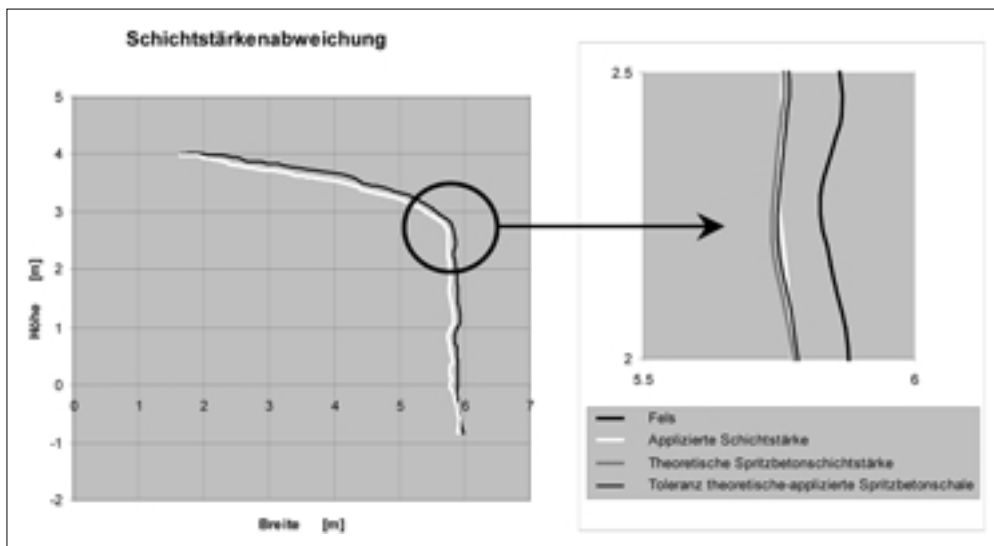


Bild 24. Erreichte Schichtstärkengenaugigkeit bei einem Baustellenversuch
Fig. 24. Shotcrete application in a blasted tunnel section

Tabelle 1. Theoretische Parametereinstellungen für die Applikation

Table 1. Theoretical parameter sets for the application

Schichtstärke [m]	Spritzdistanz d_{VE} [m]	Düsenführungs- geschwindigkeit v_D [cm/s]	Düsenrotation R_D [U/sec]	Bahnabstand d [m]	
5	2.00	20	2	0.26	
6				0.20	
7		15	1	0.27	
8				0.23	
9				0.32	
10				0.28	
11	10	1	0.25		
12			0.23		
13			0.22		
14			1.50	2	0.20
15					0.18

4 Schlussfolgerung

Die verschiedenen Randbedingungen auf der Baustelle erfordern verschiedene Applikationsmodi. Der manuelle Modus ist hauptsächlich für extrem unregelmäßige Felsoberflächen, z. B. lokales Überprofil, geeignet. Der halbautomatische Modus verbessert die Spritzbetonqualität infolge der Übernahme einiger Funktionen des Düsenführers. Der vollautomatische Modus garantiert eine hohe Leistung und optimale Qualität bei gleichmäßigem Schichtauftrag. Situationsabhängig kann der Benutzer den effizientesten Modus für den Applikationsprozess auswählen.

Eine einzelne Formel, welche alle Parameter generell beschreibt, existiert nicht. Es ist nicht schwierig, Empfehlungen bezüglich einzelner Parameter (Düsenabstand, Düsenführungsgeschwindigkeit, Betonfördermenge, Luftdruck, Rückprall...) abzugeben. Für die Intelligenz des automatischen Applikationsprozesses müssen die Abhängigkeiten der Parameter erfasst und in Beziehung zueinander gesetzt werden. Der Benutzer kann einige wesentliche Einstellungen vornehmen, um die Priorität zwischen Rückprall, Ebenheit und Spritzleistung zu definieren, z. B. kann bei einer Applikation mit geringer Ebenheitsforderung die Betonförderleistung erhöht werden, wodurch sich die Spritzzeit reduziert, oder, wenn keine hohe Leistung gefordert ist, kann z. B. eine Parametereinstellung gewählt werden, die den Rückprall minimiert. Anhand der Kalibrationsversuchsreihe (in Entwicklung) können die Baustellenverhältnisse und die Betoneigenschaften erfasst und die entsprechenden Parameter im Applikationsprozesssteuerungsprogramm gewählt werden.

Der vollautomatische Applikationsprozess birgt großes Potential, um die Leistung und die Qualität bei Applikation unter gleichmäßigen Bedingungen zu steigern. In Kombination mit anderen Hochleistungsmaschinen im Sprengvortrieb oder TBM-Vortrieb ist der Spritzbetonroboter ein Element im Bauprozess, um die Profitabilität im Tunnelbau zu steigern.

Literatur

- [1] Penin, L. F.; Balaguer, C.; Pastor, J. M.; Rodriguez, F. J.; Barrientos, A.; Aracil, R.: Robotized Spraying of Prefabricated Panels. IEEE-RAM 5 (1998) No 3 18-29.
- [2] MBT International (Switzerland) Ltd.: Jobsite Manager. Zürich: MBT UGC 1996.
- [3] Diecken, U. v.: Möglichkeit zur Reduzierung des Rückpralls von Spritzbeton aus verfahrenstechnischer und betontechnologischer Sicht. Institut für konstruktiven Ingenieurbau der Ruhr Universität Bochum 1989. Technical Report 89-2.
- [4] Gipperich, Ch.: Verfahrenstechnische Ursachen richtungsorientierter Inhomogenitäten bei der Herstellung von Spritzbeton. Institut für konstruktiven Ingenieurbau der Ruhr Universität Bochum 1994. Technical Report 94-5.
- [5] Guthoff, K.: Einflüsse automatischer Düsenführung auf die Herstellung von Spritzbeton. Institut für konstruktiven Ingenieurbau der Ruhr Universität Bochum 1991. Technical Report 91-7.
- [6] Handke, D.: Kriterien zur Beurteilung und Verminderung der Staubeentwicklung bei Spritzbetonarbeiten im Tunnelbau. Institut für konstruktiven Ingenieurbau der Ruhr Universität Bochum 1987. Technical Report 87-3.
- [7] Ngamani, G. S.: Die Automatisierung der Düsenführung zur Auftragung von Spritzbeton. Institut für konstruktiven Ingenieurbau der Ruhr Universität Bochum 1996. Technical Report 96-8.
- [8] TBG; Ruhr Universität Bochum: Arbeits- und Gesundheitsschutz durch die Reduzierung der Staubeentwicklung im Düsenbereich. Institut für konstruktiven Ingenieurbau der Ruhr Universität Bochum 1995.
- [9] Testor, M.: Vergleich umweltneutraler Spritzbetontechnologien im Baustellenversuch. Institut für Baustofflehre und Materialprüfung der Leopold-Franzens-Universität Innsbruck 1996. 2. Auflage.
- [10] Cornejo-Malm, G.: Schwinden von Spritzbeton. Institut für Bauplanung und Baubetrieb der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich 1995. 077/91.
- [11] Seith, O.: Spritzbeton bei hohen Temperaturen. Institut für Bauplanung und Baubetrieb der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich 1995.
- [12] SUVA (Hrsg.): Staubbekämpfung bei Spritzbeton-Arbeiten im Untertagebau oder Das Nass-Spritzverfahren als Alternative zum Trocken-Spritzen mit chemischen Zusätzen. SUVA Luzern 1992. Forschungsprojekt Alptransit, SUVA Luzern, AUVA Wien, TBG München, STUVA Köln, Ruhr Universität Bochum.
- [13] Richtlinie Österreichischer Betonverein: Richtlinie Spritzbeton, Anwendung und Prüfung. Oktober 1998.
- [14] SIA 198: Untertagebau. 1/1993.
- [15] Teichert, P.: Spritzbeton. Laich SA Avegno 1991.
- [16] Bock, T.: Möglichkeiten und Beispiele für Robotereinsätze im Bauwesen. VDI-Berichte Nr. 800 (1990) 137-158.
- [17] Maidl, B.: Spritzbetonroboter im Tunnelbau. VDI-Berichte Nr. 800 (1990) 207-236.
- [18] Honegger, M. (Hrsg.); Schweitzer, G.; Tschumi, O.; Amberg, F.: Symposium on Mechatronics and Machine Vision in Practice (Toowoomba Australien 1997). Zürich: IfR ETHZ 1997.
- [19] Tschumi, O.: 10th CIM Maintenance/Engineering Conference (Montreal Canada 1998). Montreal 1998. Winterthur: meycO Equipment 1998.
- [20] Tschumi, O.: Norwegian Concrete Association (Hrsg.): Third International Symposium on Sprayed Concrete (Gol Norway 1999). Oslo 1999.
- [21] Honegger, M.: Steuerung für den Betonspritzroboter Robojet SC-30. Institut für Robotik der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich 1996. Interner Bericht.
- [22] Honegger, M.; Codourey, A.: International Conference on Robotics and Automation (Leuven Belgium 1998). Zürich: IfR ETHZ 1998.
- [23] Hess, A.; Trigo, M.: Bahnplanung für den MEYCO-Robojet. Institut für Robotik der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich 1997. Semesterarbeit.
- [24] Wijnhoff, M.; Moser, S.; Girmscheid, G.: Forschungsbeitrag Spritzbeton. Institut für Bauplanung und Baubetrieb der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich 1999. Diplomarbeit.
- [25] Amberg Messtechnik AG (Hrsg.): Profiler 4000 Handbuch. Regensdorf (CH): Amberg Messtechnik AG 1997.
- [26] SIA 162: Betonbauten. 1993.
- [27] Melbye, T.: MBT (Schweiz) AG (Hrsg.): Sprayed Concrete For Rock Support. Zürich: MBT International Underground Construction Group 1994. 5. Auflage 1999.
- [28] Garshold, K.; Melbye, T.; Norwegian Concrete Association (Hrsg.): Second International Symposium on Sprayed Concrete (Gol Norway 1996). Oslo 1996.
- [29] Girmscheid, G.; MBT (Schweiz) AG (Hrsg.): Rationalisierung und Kosteneffizienz beim Sprengvortrieb durch Teil-Roboterisierung und Innovationen. Winterthur: meycO Equipment 1997. Internes Papier Sonderdruck.