

**VOLLAUTOMATISIERUNG DER SPRITZBETONAPPLIKATION –
ENTWICKLUNG DER APPLIKATIONS-PROZESSSTEUERUNG**

ABHANDLUNG
zur Erlangung des Titels

DOKTOR DER TECHNISCHEN WISSENSCHAFTEN

der

EIDGENÖSSISCHEN TECHNISCHEN HOCHSCHULE ZÜRICH

vorgelegt von

STEFAN BEAT MOSER

Dipl. Bau-Ing. ETH

geboren am
06.02.1971

von

Winterthur ZH und Brunnenthal SO

Angenommen auf Antrag von

Prof. Dr.-Ing. Gerhard Girmscheid
O.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Hans Georg Jodl
Dr. Bernhard Schaiter

2004

Kurzfassung

Die Statistik über die in den vergangenen Jahren weltweit aufgefahrenen Tunnel zeigt, dass 70 % davon konventionell und weitere 10 % mittels Gripper-TBM aufgefahren wurden. Somit erreicht der Anteil der mit konventionellen Sicherungsmitteln, d. h. mit Spritzbeton, Ankern, Stahleinbau und Netzen gesicherten Vortriebe an den gebauten Tunnel ca. 80 %. Hinzu kommt, dass die Tunnelvortriebe infolge eingeschränkter Trassierungsmöglichkeiten zunehmend in geologisch ungünstigen Formationen ausgeführt werden müssen. Häufig nimmt hier der Spritzbetoneinbau, bedingt durch die Stärke der Ausbruchssicherung, bis zu 25 % der Zykluszeit in Anspruch. Dies zeigt deutlich das Potential, welches in einer Leistungssteigerung der Spritzbetonapplikation liegt, und damit den Handlungsbedarf, d. h. die Optimierung des Einbauprozesses von Spritzbeton.

Der heutige Stand der Spritzbetontechnologie erfüllt bezüglich der Spritzverfahren, der Düsensysteme und der Spritzbetonrezepturen weitgehend die Anforderungen an Hochleistungsvortriebe mit *kurzen Teilprozesszyklen*. Die Spritzbetonapplikation mit manueller Düsenführung und mittels *mechanisch-kinematischer Applikationssystemen (MkA) mit individueller oder gekoppelter Gelenksteuerung* erfüllt hingegen weder die Forderung nach einer konstant hohen Leistung noch diejenige nach einer konstant hohen Spritzbetonqualität. Diese Defizite bei der Applikation von Spritzbeton werden in der vorliegenden Arbeit gelöst, indem die Systematik, mit welcher der Düsenführer die Applikation intuitiv vornimmt, von einem Steuerungsprogramm übernommen wird, welches reale Messdaten verarbeitet.

Mit der Implementierung der *Applikations-Prozesssteuerung* in ein MkA mit mechanischer Prozesssteuerung, d. h. mit direkter Düsenführung mittels eines Joysticks, und der Verknüpfung dieser Prozesssteuerungen mit einem Vermessungssystem, welches die reale Applikationsoberfläche vermisst, können *konstante Spritzbetonschichtdicken* vollautomatisch prozessgesteuert appliziert werden. Die entwickelte Applikations-Prozesssteuerung ist dabei sowohl von der kinematischen Struktur des MkA als auch von der Verfahrenstechnik der Spritzbetonapplikation unabhängig und kann deshalb grundsätzlich auf jedes MkA übertragen werden. Durch die mechanische Prozesssteuerung mit vollautomatisierter Applikations-Prozesssteuerung werden die orthogonale Orientierung der Düse zur Bezugsoberfläche sichergestellt, die konstante Spritzdistanz a und Bahngeschwindigkeit v_D eingehalten und die Düse in parallelen Spritzbahnen mit konstantem *Bahnabstand* d über die Applikationsoberfläche geführt. Dadurch lassen sich mit effektiven Betonförderleistungen $Q_{\text{eff}} \leq 15 \text{ m}^3/\text{h}$ konstante Spritzbetonschichtdicken von $0.03 \text{ m} \leq S \leq 0.20 \text{ m}$ mit einer *hohen Gleichmässigkeit der Schichtdicke* applizieren. Der wirtschaftliche Vorteil der vollautomatisierten prozessgesteuerten Spritzbetonapplikation tritt besonders bei geringen Schichtdicken mit $S \leq 0.07 \text{ m}$ hervor, da bei manueller Düsenführung bis dato entweder tendenziell zu viel Spritzbeton appliziert wird, welcher nicht vergütet wird, oder aber die effektive Betonförderleistung reduziert wird, was sich wiederum auf die Zykluszeit der Ausbruchssicherung auswirkt. Durch die neu entwickelte Applikations-Prozesssteuerung können für beliebige *Charakteristiken der Spritzstreifen* die entsprechenden Applikationsparameter berechnet werden. Die Kalibrierung der Applikations-Prozesssteuerung kann deshalb durch die Eingabe der baustellenspezifischen, d. h. düsensystem- und spritzbetonrezepturabhängigen Charakteristiken der Spritzstreifen mit geringem Aufwand vorgenommen werden. Die entwickelte Applikations-Prozesssteuerung ist sehr effizient und hat sich in Praxisversuchen bewährt. Ausserdem konnte durch die hohe Genauigkeit der Applikation von konstanten Schichtdicken ein neues Einsatzgebiet der MkA erschlossen werden: die Beschichtung von Tübbing mit Spezialmörtel zur Erhöhung des Feuerwiderstands.

Abstract

The statistics of tunnels built world wide show that in the last years 70 % of all tunnels were built conventionally and a further 10 % by use of Gripper-TBM. Thus, in about 80 % of the tunnels conventional rock support means (such as shotcrete, bolts, steel arches and nets) were used. Furthermore, caused by limited possibilities of route planning, with increasing frequency tunnels have to be built in geologically unfavorable ground. Because of the layer thickness frequently the application of shotcrete takes up to 25 % of the overall cycle time. This fact shows clearly the potential of an increased efficiency in shotcrete application.

Today, spraying methods, nozzle systems and mix-designs widely meet the requirements of high performance advance with short process cycles. But manual shotcrete application and shotcrete application by manually controlled semi-automated manipulators with partially coupled joints do not yet achieve high enough a performance and constantly high quality of shotcrete. In this thesis these deficiencies concerning the application of shotcrete are solved by replacing the systematics of application the nozzle operator uses intuitively by a control program.

With the implementation of the application process control into a mechanic-kinematical application system that enables direct control of the nozzle with one joystick by mechanical process control, and the combination of these two process controls with a measuring system that surveys the application surface, constant layer thicknesses can be applied. The application process control that has been developed is independent of the kinematical structure of the manipulator as well as of the shotcreting method and can therefore basically be applied to any other mechanic-kinematical application system. Orthogonal orientation and constant distance of the nozzle to the reference surface, as well as nozzle moving velocity are controlled fully-automatically and the nozzle is driven over the application surface by mechanical process control with fully-automated application process control in parallel path lines with constant path line distances. At concrete conveying capacities of $Q_{\text{eff}} \leq 15 \text{ m}^3/\text{h}$, constant layer thicknesses of $0.03 \text{ m} \leq S \leq 0.20 \text{ m}$ can be applied, resulting in high even layer thicknesses. The economical advantages abound especially for layer thicknesses $S \leq 0.07 \text{ m}$ because up to now tendentially too much shotcrete has been applied or the effective concrete conveying capacity has been reduced which resulted in a longer rock support cycle time.

With the newly developed application process control, the corresponding application parameters can be calculated for any characteristic of shotcrete distribution in the deposition area. The application process control can be calibrated easily by putting in the site specific characteristics of the distribution in the deposition area that depend on nozzle system and mix-design.

The developed application process control has been proved to be efficient and has stood the tests of practice. Because of the high degree of accuracy of the application of constant layer thicknesses the field of use of the mechanic-kinematical application system with fully-automated process controlled nozzle movement and joint control could be enlarged. It has been used recently to coat segments of a TBM-driven tunnel with fire resistant mortar to improve fire resistance.