

SYSTEMVERHALTEN UND

PROZESSOPTIMIERUNG BEIM ERDDRUCKSCHILD

U. Maidl

Eine konsequente Analyse der Prozessdaten kann die Sicherheit, aber auch die Effektivität des Ressourceneinsatzes beim hoch technisierten Schildvortrieb erheblich steigern. Präventive Maßnahmen zur Prozessoptimierung können durch die zeitnahe Analyse des Systemverhaltens während des Bauablaufs rechtzeitig eingeleitet werden. Eine Analyse des Systemverhaltens wird durch die Aufspaltung des Bauablaufs in Teilprozesse und die Definition der Schlüsselprozesse möglich. Im folgenden Artikel wird am Beispiel des Erddruckschildes aufgezeigt, wie beim heutigen Stand der Technik Prozesse realitätsnah simuliert und während der Ausführung unter Einsatz der vorhandenen Mess- und Datenerfassungstechnik analysiert werden können.

A consistent analysis of the process parameters in highly mechanised shield tunnelling, not only increases the safety, but it also improves the efficiency of the resources in action. The real time analysis of the system's behaviour allows to timely carry out preventive measures during the construction process with the aim of optimizing the construction process. The analysis of the system's behaviour is possible by splitting the construction sequence in a series of partial processes and by defining the key processes. The present paper shows a EPB shield study case, which shows how the present state of the art allows to simulate processes realistically during construction, by applying existing monitoring and data registration technology.

1 EINLEITUNG

Die Sicherheit, aber auch die Effektivität des Ressourceneinsatzes kann beim hoch technisierten Schildvortrieb durch die konsequente Analyse der Prozessdaten erheblich gesteigert werden. Dies ist beim Schildvortrieb vor dem Hintergrund der gewaltigen monetären und zeitlichen Risiken bei einem gestörten Bauablauf oder Störfall (Maschinenschaden, Verbruch, etc.) von besonderer Relevanz. Präventive Maßnahmen zur Prozessoptimierung können nur durch die zeitnahe Analyse des Systemverhaltens während des Bauablaufs rechtzeitig eingeleitet werden.

Die Vorhersage des Systemverhaltens ist beim Schildvortrieb allein aufgrund von vorab durchgeführten Baugrunduntersuchungen und rechnerischen Nachweisen nicht mit ausreichender Zuverlässigkeit möglich. Aus diesem Grunde werden im Eurocode 7 (Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik) für Baumaßnahmen mit komplexen Wechselwirkungssystemen, bestehend aus Baugrund, Bauwerk und Bauverfahren, Kombinationen der üblichen geotechnischen Untersuchungen und Berechnungen (Prognosen) mit der laufenden messtechnischen Kontrolle des Bauwerkes, des Baugrundes und des Bauverfahrens gefordert. In [1] wurden neuartige Ansätze der Beobachtungsmethode bei schwierigen technischen Randbedingungen und Einsatz von hoch mechanisierten Tunnelbauverfahren aufgezeigt. Der Ansatz basiert auf der Verknüpfung der Finiten Elemente Methode zur Simulation des Schildvortriebes und dem Datenmanagement während der Bauausführung. Im vorliegenden Artikel soll nun auch auf die wirtschaftlichen und baubetrieblichen Optimierungsmöglichkeiten im Rahmen des Process-Controllings eingegangen werden.

2 SYSTEMVERHALTEN UND BEOBACHTUNGSMETHODE

In Anlehnung an die ÖNORM B 2203-2 Untertagebauarbeiten - Kontinuierlicher Vortrieb versteht man unter Systemverhalten das Verhalten des Gesamtsystems, resultierend aus Gebirge und Vortriebsverfahren. Die DIN 1054 umschreibt den Begriff Systemverhalten als Bauwerk-Baustoff-Umgebungs-Wechselwirkungen. Tunnel, die im Schildvortrieb aufgeföhren werden, zählen zu den Baumaßnahmen mit hohem Schwierigkeitsgrad und ausgeprägten Bauwerk-Baustoff-Umgebungs-Wechselwirkungen. Sie sind in besonderem Maße risikobehaftet, weil der wesentliche Baustoff – der Baugrund – schwer zu erkennen und zu beschreiben ist. Beim maschinellen Tunnelvortrieb ist ein Versagen der Ortsbrust vorab nicht erkennbar, falls nicht ausreichend messtechnische Daten zur vortriebsbegleitenden Auswertung zur Verfügung stehen.

Aus diesem Grunde schreiben die Neufassungen der ÖNORM ENV 1997 – 1 (Eurocode 7) [2] und der DIN1054 [3] für komplexe geotechnische Bauwerke die Beobachtungsmethode vor. Ziel ist es, Maßnahmen, die vor Beginn der Bauausführung festgelegt wurden, während der Bauausführung über Messsysteme zu verifizieren. Prognosen sind zu überprüfen bzw. die Berechnungsmethode ist anzupassen, wenn sich das Verhalten von Baugrund und Bauwerk nicht wie erwartet einstellt. Sind die Gebrauchstauglichkeit oder sogar die Standsicherheit gefährdet, sind Gegenmaßnahmen einzuleiten.

3 TEIL- UND SCHLÜSSELPROZESSE

Eine Analyse des Systemverhaltens wird durch die Aufspaltung des Bauablaufs in Teilprozesse und die Definition der Schlüsselprozesse möglich. Bild 2 zeigt die Vorgehensweise exemplarisch für den Erddruckschild. In der Prozesskette können etwa 10 Teilprozesse für den Bodenabbau, den Bodentransport und die Bodendeponierung differenziert werden. Ebenfalls dargestellt sind die Risiken sowie die Abhängigkeiten innerhalb der Prozesskette. Die Weichen für Erfolg und Misserfolg werden bereits während des Bodenabbaus in der Abbaukammer gestellt.

Den Schlüsselprozess für das System- und Transportverhalten stellt die Bodenkonditionierung dar. Verfügt der Boden in der Abbaukammer nur über unzureichende Eigenschaften, so hat dies unmittelbare Auswirkungen auf die Gebirgsstützung, den Materialtransport und die Aushubdeponierung oder Aushubwiederverwertung.

Als wichtigste Zeit- und Kostentreiber sind beim Erddruckschild (in Bild 1 rot dargestellt) zu nennen:

- schlechter Materialfluss durch Schneidrad und Abbaukammer
- hoher Verschleiß
- Verflüssigung und Kontaminierung des Aushubs

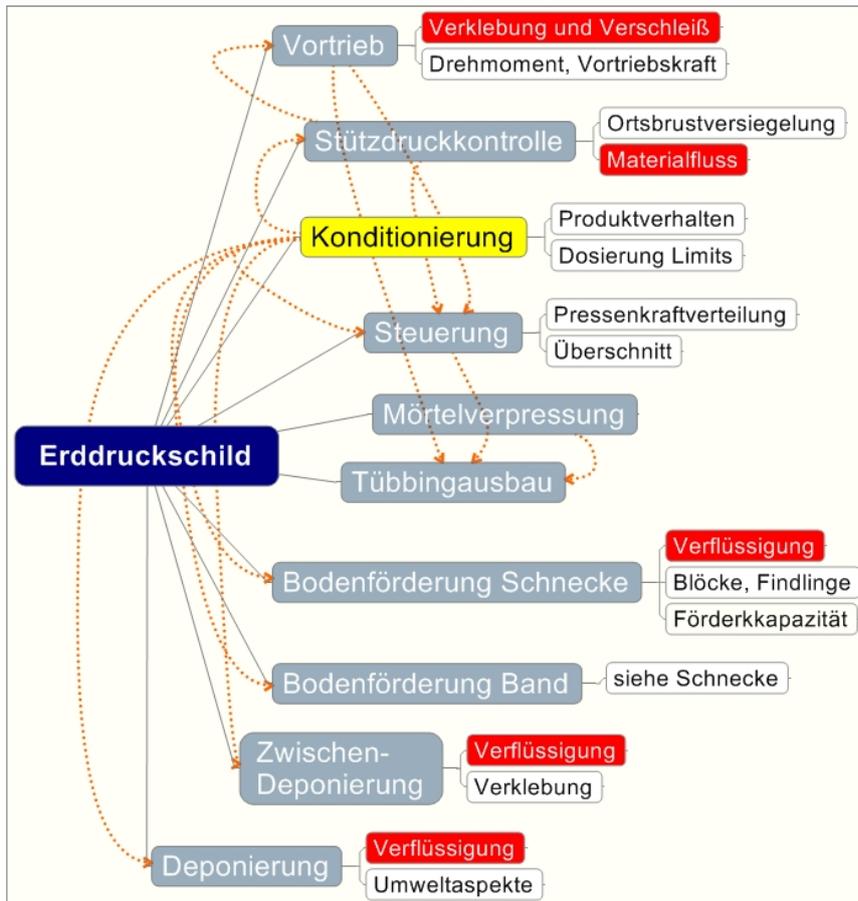


Bild 1: Prozesskette, Abhängigkeiten und Risiken beim Schildvortrieb mit erdgestützter Ortsbrust
 Fig. 1: Process chain, dependencies and risks in earth pressure balanced shield tunnelling.

4 PROCESS-CONTROLLING

Ziel des Process-Controlling ist es, das Systemverhalten – in-situ und möglichst in Echtzeit – unter Berücksichtigung sämtlicher Interaktionen zwischen Baugrund und Bauverfahren zu analysieren. Der hoch mechanisierte Schildvortrieb eignet sich besonders zur Implementierung der Beobachtungsmethode, da zahlreiche Messdaten zur Verfügung stehen. Da heutzutage fast alle Funktionen der Vortriebsmaschine elektrisch oder elektro-hydraulisch gesteuert werden, sind die entsprechenden Größen messtechnisch erfassbar und anschließend digital weiterverarbeitbar. Eine umfassende Aufzeichnung der Vortriebsdaten gehört bei modernen Schildmaschinen zum Stand der Technik [6]. Im Abstand von einer bis zehn Sekunden werden zwischen 200 und 400 verschiedene Maschinendaten, so genannte Momentanwerte, aufgezeichnet. Pro Tag fallen so zwischen 1,7 Mio. und 35 Mio. Maschinendaten an, die automatisch für den jeweiligen Vortriebszyklus in Mittelwert- und Endwertdateien zusammengefasst werden können.

Separat davon wird üblicherweise während des Vortriebs eine Vielzahl von geodätischen und geotechnischen Daten protokolliert. Während dies früher manuell und damit in sehr unterschiedlich langen Zeitintervallen geschah, werden heute Messroboter eingesetzt, die vorab definierte Messpunkte automatisch erfassen und die Daten digital übermitteln.

Neben den Maschinendaten und geodätischen Messdaten werden an weiteren Prozessschnittstellen (Separieranlage, Tübbingwerk, etc.) Daten aufgenommen, welche meistens nur analog in Schicht- oder Tagesprotokollen vorliegen. Zur vollständigen Berücksichtigung müssen diese erst aufbereitet werden und können aufgrund der zeitlichen Verzögerung nur bedingt genutzt werden. Die besondere Herausforderung an die Beobachtungsmethode stellt die vortriebssynchrone (real-time) Bearbeitung der Informationen und Daten dar. Bild 2 zeigt den Ansatz zur Implementierung eines bauverfahrensorientierten Controllingsystems.

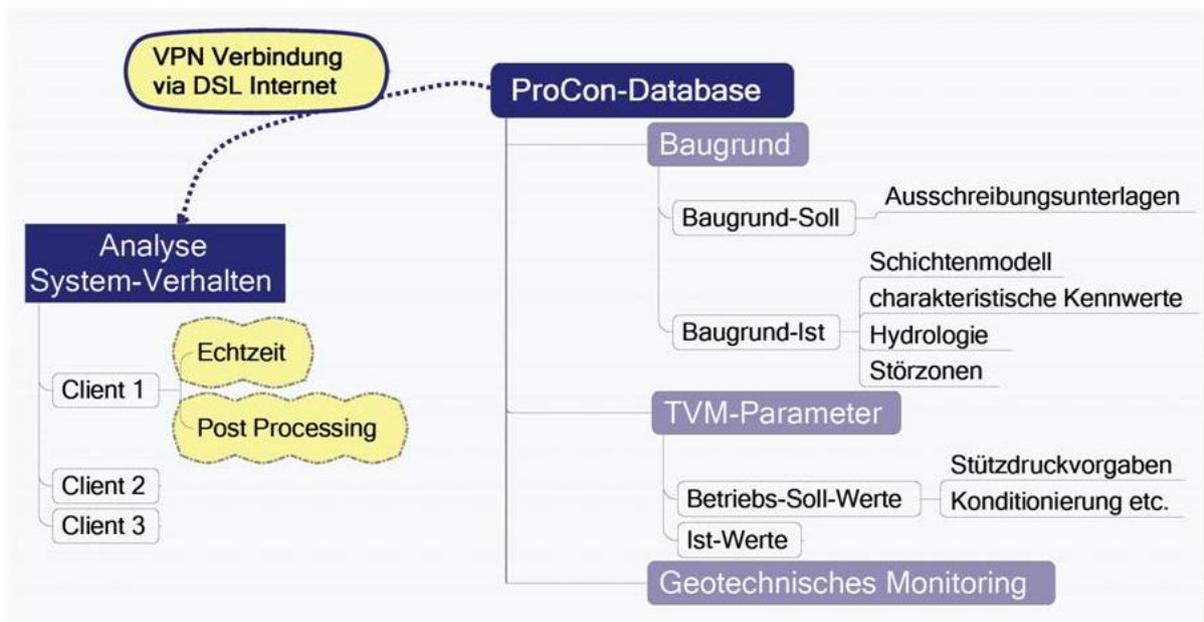


Bild 2: Datenbankstruktur für das Process-Controlling beim Schildvortrieb
 Fig. 2: Structure of the data bank for shield tunnelling Process Controlling

Sämtliche vortriebsrelevanten Informationen werden in Echtzeit über eine VPN-Verbindung übertragen und mittels einer speziell für den Schildvortrieb entwickelten Software nach Key Performance Indicators wie zum Beispiel Ortsbruststabilität, Vortriebsgeschwindigkeit, spezifischer Energiebedarf, Schauminjektions- und Expansionsrate analysiert. Betriebsstörungen, Baugrundänderungen sowie deren verfahrenstechnische Konsequenzen können über die Fernanalyse in Echtzeit mitverfolgt oder nachträglich analysiert werden.

Die Datenbank enthält die verfahrensrelevanten Daten des Baugrundes, der Vortriebsmaschine sowie die geotechnischen Messergebnisse. Die Implementierung baubetrieblicher Daten, beispielsweise die zeitabhängigen Kosten, Kosten für Stoffe und Energiebedarf, sind ebenfalls möglich. Die Ergebnisse der wissensbasierten Prozessanalysen können den verantwortlichen Projektbeteiligten in Echtzeit zur Verfügung gestellt werden. Im Rahmen der Beweissicherung wird der vollständig analysierte Vortriebsverlauf dauerhaft archiviert und ist jederzeit nach zeitlichen und örtlichen Kriterien abrufbar (Bild 3).

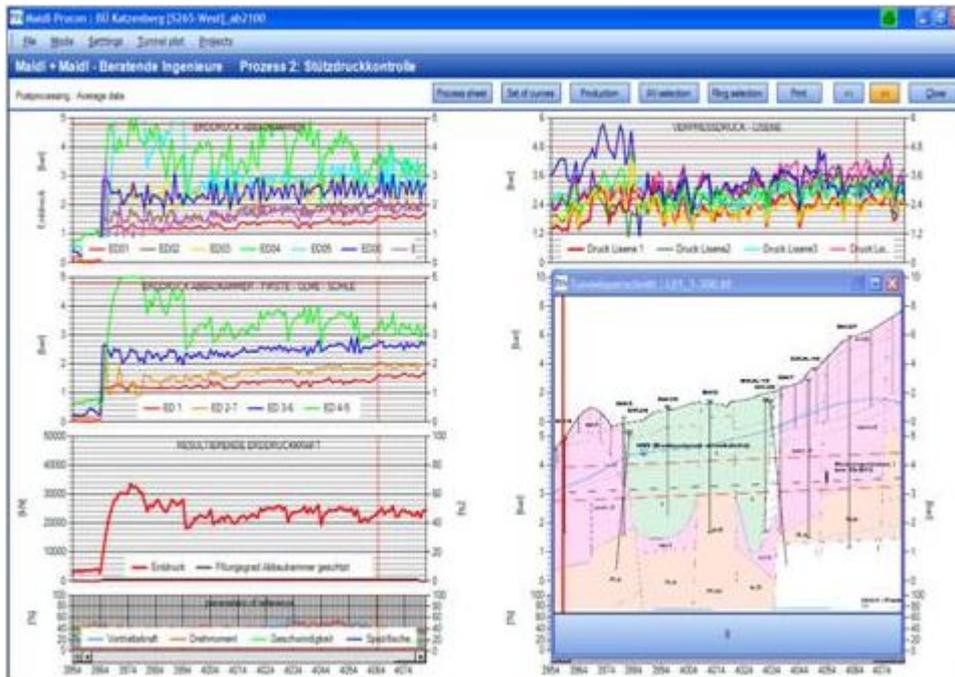


Bild 3: Bildschirmoberfläche MAIDL-Procon am Beispiel: Prozess Stützdruckkontrolle
 Fig. 3: Example of a MAIDL-ProCon working surface for face support pressure control

Für sämtliche Teilprozesse werden separate Regelkreise entsprechend der schematischen Vorgehensweise in Bild 4 entwickelt und visualisiert.

Der Soll-Ist-Vergleich berücksichtigt alle maßgebenden verfahrenstechnischen und geotechnischen Parameter. Der Prozess als Regelstrecke (Schildvortriebsmaschine) liefert digital messbare Ergebnisse, die der zentralen Datenbank zugeführt werden. Computerbasiert werden die Ergebnisse mit den Planungsvorgaben (Führungsgrößen) verglichen und die Ergebnisse der geotechnischen Fachbauleitung (Regler-Steuer Einheit) in ausgewerteter und visualisierter Form zur Verfügung gestellt. Die abschließend vom erfahrenen Anwender vollzogene Interpretation des Soll-Ist-Vergleiches führt zu Anweisungen, die über die Ausführenden umgesetzt werden.

Die Planungsvorgaben (Führungsgrößen) entstammen den vor der Bauausführung durchgeführten geotechnischen Berechnungen und Prognosen. Entsprechend der Philosophie der Beobachtungsmethode sind die Beobachtungsdaten des Mess- und Monitoringsystems einzubeziehen. Nach Bild 4 erfolgt die Fortschreibung des zu erwartenden Verhaltens durch eingehende Analysen, Rückrechnungen (back analyses) sowie durch Simulation.

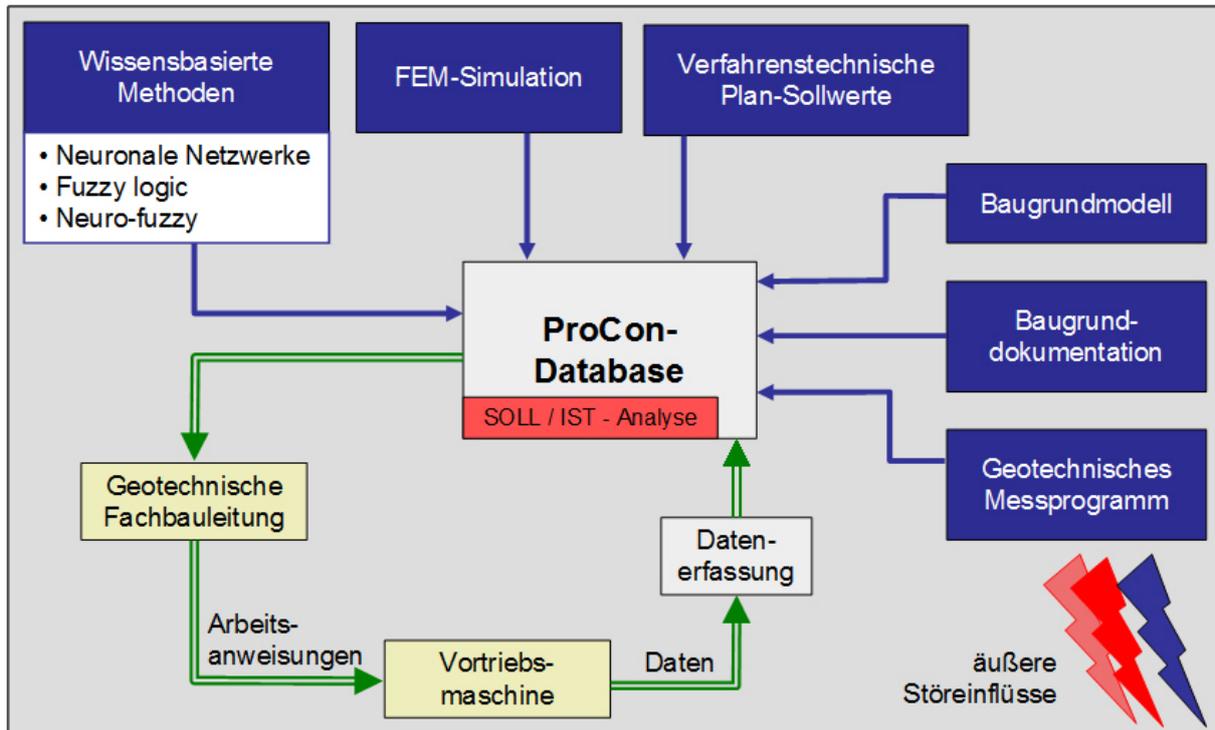


Bild 4: Das kybernetische System als Basis des wissensbasierten Soll-Ist-Vergleiches
 Fig. 4: The cybernetic system as a basis for a knowledge based actual vs. theoretical data comparison

Da der klassische Controllingregelkreis über die Controllinginstanz und die geotechnische Fachbauleitung bei der Datenflut unmöglich in der Lage wäre, so genannte real-time Entscheidungen zu treffen, empfiehlt sich, wie in Bild 4 dargestellt, so genannte Reaktionsprogramme oder Expertensysteme (wissensbasierte Methoden) zur Entscheidungsfindung zu implementieren. Für den Schildvortrieb eignen sich besonders folgende Methoden:

- Analytische mechanische, strömungsmechanische und geotechnische Berechnungen
- Wissensbasierte Systeme (Expertensysteme)
- Statistik, Stochastik
- Neuronale Netze
- Fuzzy logic
- Neuro-fuzzy

Weitere Tools, die zur Wissensbildung beitragen, können in den Controllingkreis implementiert werden. Die automatische Vorauserkundung des Baugrundes (z.B. das SSP-System der Herrenknecht AG) könnte künftig einen wichtigen Beitrag liefern. Je aussagefähiger und eindeutiger die Baugrundinformationen sind, umso leichter ist es möglich, das Simulationsmodell zu verbessern und zu kalibrieren.

5 FEM-SIMULATION DES SCHILDVORTRIEBS

Systemverhalten Baugrund-Maschine

Die FEM-Simulation des Schildvortriebs ist ein wichtiges Tool zur Ermittlung der Planungsvorgaben sowie zur Durchführung der Simulation und back-analyses. Mit Hilfe der FEM-Simulation wird es beim heutigen Stand der Technik möglich, die äußerst komplexen Interaktionen zwischen Baugrund und Vortriebsmaschine darzustellen. Die FEM-Simulation gliedert sich in folgende Phasen:

1. Geometrische und verfahrenstechnische Modellierung mit wirklichkeitsgetreuer Diskretisierung aller Maschinenelemente (Schildschwanzverpressung, Schildspaltinjektion, Ortsbruststützung, etc.).
2. Stoffliche Modellierung mit Wahl des geeigneten Materialgesetzes (Berücksichtigung von Porenwasserüberdrücken, Kriecheinflüssen, nicht-linear elastisches Verhalten, etc.).
3. Step-by-step-Analyse zur Berücksichtigung der Einflüsse unterschiedlicher Bauphasen auf den Spannungszustand im Baugrund.
4. Verifikation der Ergebnisse und Plausibilitätsüberprüfung.

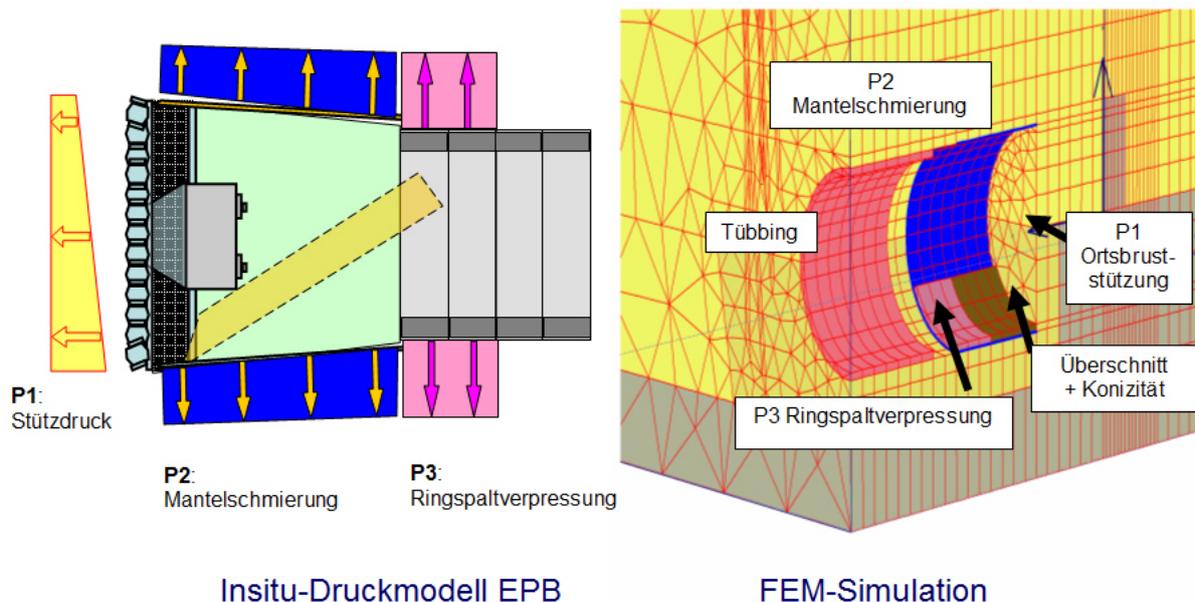


Bild 5: FEM-Modell zur Analyse des Systemverhaltens

Fig. 5: FEM Model for the analysis of the system's behaviour

Bild 5 zeigt die 3D-Modellierung einer Schildvortriebsmaschine im Baugrund. Zu erkennen sind die Bereiche Abbaukammer, Schildbereich, Ringspaltverpressung und Tübbingauskleidung.

Das Modell ist so konzipiert, dass sämtliche maschinentechnische Messgrößen, beispielsweise der Stützdruck an der Ortsbrust, Stützdruck im Ringspalt oder der "Volume Loss" durch Überschnitt im Bereich des Schildmantels oder alternativ aktive Stützdruckvorgaben in der Ausbruchlaibung, Mörtelverpressvolumen und Ringspaltgröße, Steifigkeit der Tübbing-

auskleidung, etc., berücksichtigt werden. Durch diese Vorgehensweise wäre es theoretisch möglich, Maschinenmessdaten ohne Zeitverzögerung direkt in das Modell einzulesen und wahlweise Berechnungsergebnisse, beispielsweise Oberflächensetzungen, Gebirgsspannungen, Beanspruchung der Tunnelauskleidung, etc., zu erhalten. Die Berücksichtigung der Umgebungseinflüsse sowie Baugrundverbesserungsmaßnahmen ist ebenfalls möglich.

Im Rahmen der Modellkalibrierung werden die Prognoseergebnisse mit den tatsächlichen Messergebnissen (beispielsweise Geländeoberflächensetzungen, Erddruckmessungen, Inklino-/ Extensometermessungen) verglichen. Die Kalibrierung ermöglicht es, das Simulationsmodell soweit zu modifizieren, dass die Simulationsergebnisse mit den tatsächlich gemessenen Werten übereinstimmen.

Ein Nachteil der FEM-Simulation ist die sehr aufwendige und trotzdem unsichere Kalibrierung des Modells. Die Unsicherheit bezüglich der tatsächlichen Baugrundsichtung, der Bodenparameter und der verwendeten Stoffgesetze, aber auch die Vielzahl nicht modellierbarer Aspekte (zeitabhängig, verfahrensabhängig, personenabhängig) führen dazu, dass die Simulation zwar zur qualitativen Wissensbildung hervorragend geeignet ist, aber nur unter Vorbehalt für quantitativ richtige Prognoseergebnisse steht.

Bei modernen Schildmaschinen besteht die Möglichkeit, dass nicht nur der Stützdruck an der Ortsbrust und die Verpressung des Ringspalts zwischen Boden und Tübbing aktiv gesteuert werden, sondern auch der Druck im Spalt zwischen Schildmantel und Boden durch entsprechende Injektionen entlang des Schildes.

Unter Nutzung der gemessenen Druckverteilungen im gesamten Bereich der Schildmaschine wurde ein neues Berechnungskonzept zur dreidimensionalen Simulation des Vortriebs entwickelt. Es wird bei diesem Modell nicht wie in [12] beschrieben, die Tunnelbohrmaschine detailgetreu simuliert, sondern vielmehr direkt auf die Interaktion Maschine - Baugrund eingegangen.

Wie in den sonst gängigen Berechnungsmodellen [10] wird bei dem hier vorgestellten "Druckmodell" zur Stützung der Ortsbrust und Simulation der Ringspaltverpressung an entsprechender Stelle ein Druck mit der jeweiligen Gradienten des Stützmediums gegen den Baugrund aufgebracht. Es hat sich gezeigt, dass die Simulation der Schildkonizität mittels einer vorgegebenen Kontraktion nicht immer geeignet ist, da nicht immer davon ausgegangen werden kann, dass sich der Spalt zwischen Ausbruchskontur und Schildmantel auch entsprechend der vorgegebenen Kontraktion verformt. Im "Druckmodell" wird die Schildpassage deswegen nicht mittels Kontraktion gesteuert, sondern aktiv durch Aufbringen eines Stützdrucks mit entsprechender Gradienten entlang der Ausbruchslängung. Eine schematische Darstellung des Druckmodells ist in Bild 5 dargestellt.

Die Verformungen und Konvergenzen während der Schildpassage ergeben sich bei dem Modell dann abhängig von der anliegenden Druckverteilung. Liegen entsprechend geringe Drücke an, entstehen große Verformungen, liegen dagegen höhere Drücke an, dann ergeben sich kleinere Verformungen. Entsprechend ergeben sich dann auch die Setzungen an der Geländeoberfläche.

Zur Durchführung von Setzungsprognosen können bei diesem Berechnungsverfahren nun direkt die Soll-Vorgaben für die Drücke an der Ortsbrust, dem Schildspalt und der Ringspaltverpressung angesetzt werden. Für Kalibrations- und Vergleichsberechnungen werden dann im Rahmen des Process-Controllings die während des Vortriebs gemessenen Ist-Werte der Tunnelbohrmaschine verwendet und die Resultate für den Soll-Ist-Vergleich herangezogen.

Simulation Materialfluss Erddruckschild

Die Prozessoptimierung erfordert neben der Analyse des Systemverhaltens weitere Kenntnisse über die strömungsmechanischen Abläufe in der Abbaukammer. Beim Erddruckschild genügt es nicht die Druckvorgaben P1, P2, P3 entsprechend Bild 5 zu ermitteln und während der Ausführung zu überwachen. Der an der Druckwand gemessene Erddruckwert stellt auch auf Sollniveau noch keinen Garant für setzungsarmen, optimierten Vortrieb dar. Verfügt der Boden nicht über die erforderlichen rheologischen Eigenschaften ist die aktive Stützdruckkontrolle zweifelhaft. Mit der Zunahme des Schneiradanpressdrucks und des Drehmoments sinkt bei zunehmendem Verschleiß die Vortriebsgeschwindigkeit. Das zeitabhängige Gebirgsverhalten wird hierdurch unmittelbar beeinflusst.

Bild 6 zeigt vereinfacht in einer 2-D FEM-Darstellung die Strömungsvorgänge in der Abbaukammer des derzeit größten Erddruckschildes mit 15 m Durchmesser. Die Vortriebsmaschine verfügt über zwei Fördererschnecken im Sohlbereich und eine zusätzliche Fördererschnecken im Zentrum.

Foam Concept Madrid M-30

m Maidl + Maidl
Consulting Engineers

Poor material flow to the screw should be avoided with an active foam injection concept

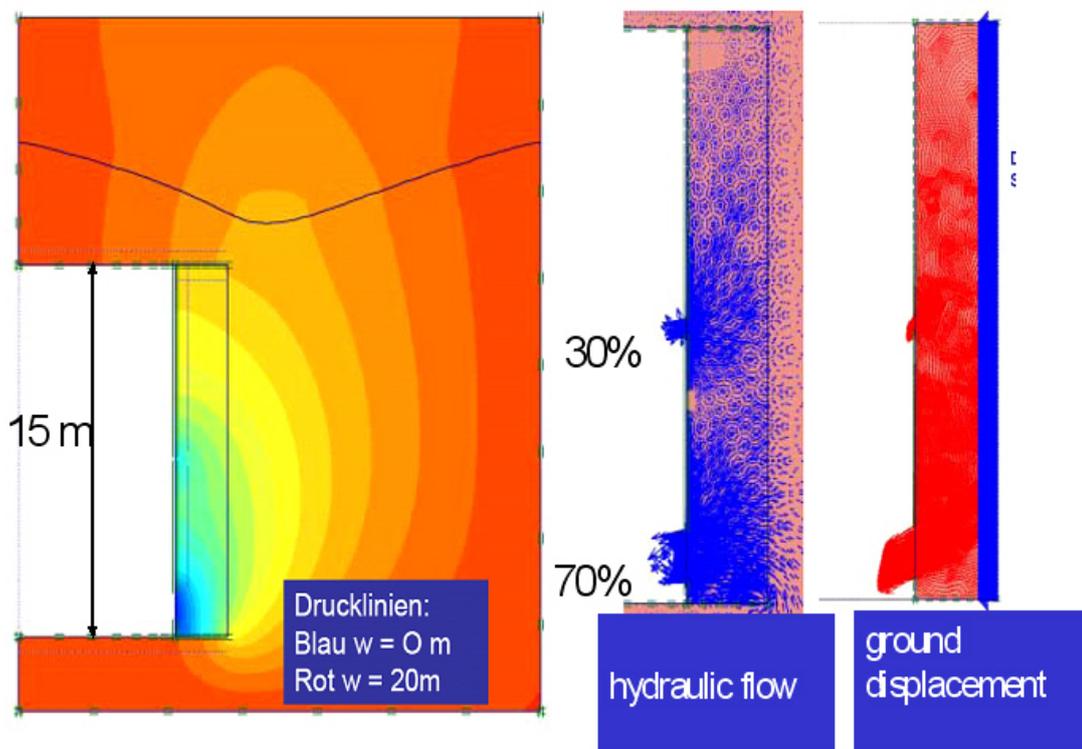


Bild 6: FEM-Modell zur Analyse des Strömungsverhaltens (Erddruckschild Madrid M-30); links und mitte: stationäre Strömung einer idealen Flüssigkeit; rechts: Bodenverformung nach Mohr-Coulomb-Kriterium

Fig. 6: FEM model for the analysis of the material flow in the excavation chamber (EPB Shield Madrid M-30); Left and centre: stationary flow of an ideal fluid; Right: ground deformation according to Mohr-Coulomb criterion

Als Ergebnis der Simulationsuntersuchungen ist festzustellen:

- Die Druckverhältnisse der Ortsbrust differieren von den tatsächlich gemessenen Druckverhältnissen an der Druckwand in Abhängigkeit des Strömungsbildes. Dies ist bei der Kontrolle der globalen und lokalen Ortsbruststandfestigkeit zu berücksichtigen.
- Der Materialfluss in der Abbaukammer konzentriert sich ohne aktive Konditionierung auf die Bereiche in der unmittelbaren Umgebung der Förderschnecken. In weiten Bereichen der Abbaukammer findet kaum Materialfluss statt. Es besteht die Gefahr, dass der Boden in diesen Bereichen konsolidiert und hierdurch seine Fließeigenschaften verliert.

Durch die prozessgesteuerte Bodenconditionierung kann das Strömungsbild aktiv manipuliert und optimiert werden. Hierzu werden sämtliche Sensoren zur Druck- und Volumenkontrolle in die Analyse des Strömungsverhaltens einbezogen.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass durch numerische Simulationen maßgebende Interaktionen zwischen Baugrund, TVM zumindest qualitativ untersucht werden können. Das hieraus gewonnene Wissen wird zu Prozessoptimierung während der Ausführung herangezogen. Die quantitative Richtigkeit der Ergebnisse kann aufgrund zahlreicher fehlender oder nicht beschreibbarer Parameter sowie Unsicherheiten bei den Stoffgesetzen nicht garantiert werden. Die Ergebnisanalyse und Kalibrierung der Modelle auf Basis der geotechnischen Messergebnisse und Vortriebsdaten erlaubt zuverlässige Prognosen.

6 COMPUTERBASIERTE ECHTZEIT-DATENANALYSE

Nachfolgend soll am Beispiel eines Erddruckschildes die Vorgehensweise der computerbasierten Echtzeitdatenanalyse vorgestellt werden. Auf die Darstellung der Unterprozesse und analytischen Zusammenhänge wird verzichtet.

Der Vortriebsverlauf kann als optimiert betrachtet werden, wenn die Maschine mit hoher Geschwindigkeit und optimalem Materialfluss, gekennzeichnet durch niedriges Drehmoment, niedrige Vortriebskraft und nachweislich aktiver Stützdrucksteuerung operiert.

Als Schlüsselparameter der Vortriebsgeschwindigkeit sind zu definieren:

- Die Schneidrad-Drehzahl
- Die Schneidrad-Anpresskraft
- Der Stützdruckhöhe in der Abbaukammer
- Der Materialfluss bzw. die Parameter Schauminjektionsrate, Schauminjektionsdrücke, Schaumrezeptur, Schaumadditive, Dichte des Bodens in der Abbaukammer.

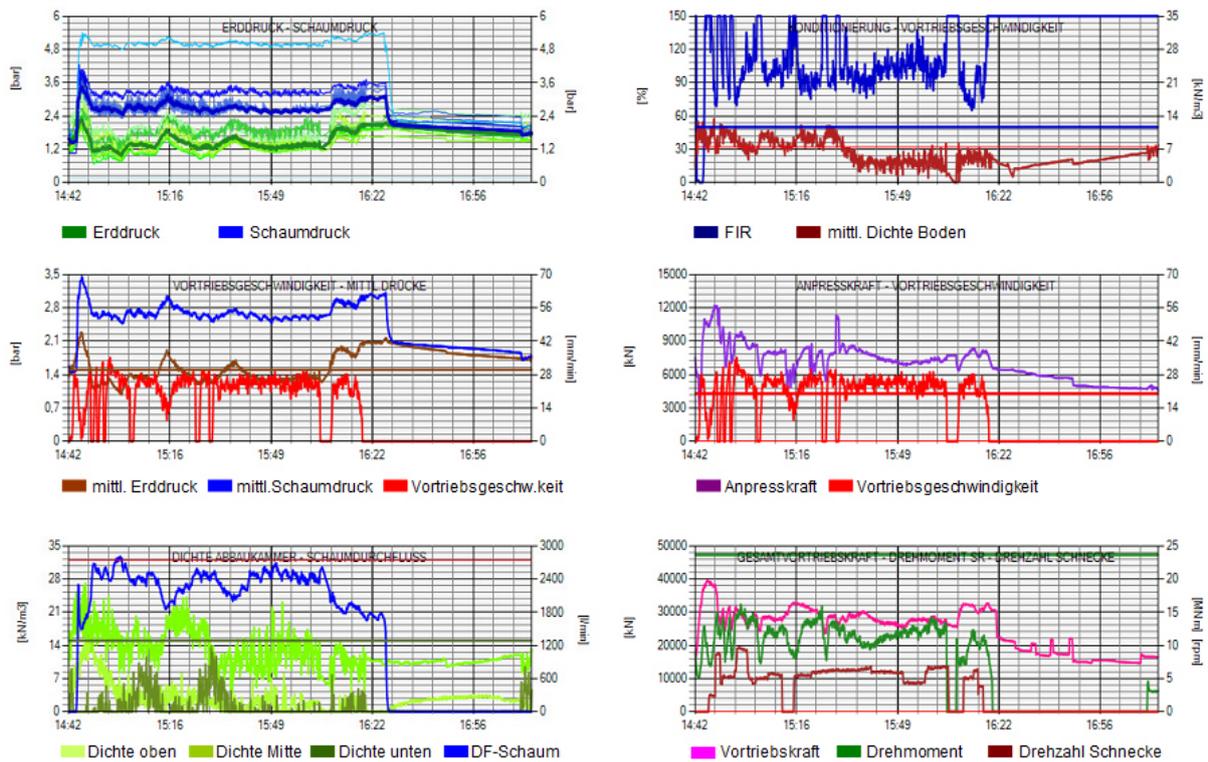


Bild 7: Prozessanalyse Vortriebsgeschwindigkeit beim Schildvortrieb mit erdgestützter Ortsbrust
 Fig. 7: Advance speed process analysis for EPB shield tunnelling.

Auf Basis der in Bild 7 dargestellten Visualisierung der Messwerte, Sollwerte und Rechenwerte kann der erfahrene Anwender folgende Rückschlüsse gewinnen:

Grafik links oben

Dargestellt sind die Kurvenscharen der Erddruck-Messung (grün) und Schauminjektionsdrücke (blau). Die Korrelation und die geringen Differenzdrücke bestätigen die aktive Stützdruckkontrolle über die Schauminjektionsanlage. Des Weiteren ist von einem guten Materialfluss in der Abbaukammer auszugehen.

Grafik links Mitte

Stützdruck und Vortriebsgeschwindigkeit verhalten sich umgekehrt proportional. Mit zunehmendem Erddruck sinkt die Vorschubgeschwindigkeit. Dies ist dadurch zu erklären, dass der zum Lösen des Bodens an der Ortsbrust zur Verfügung stehende Kraftanteil (Netto-Anpresskraft) mit zunehmendem Erddruck reduziert wird.

Grafik links unten und Grafik rechts oben

Mit zunehmender Schauminjektion sinkt die Dichte des Bodens in der Abbaukammer. Eine effektive Bodenconditionierung mit Schaum ist somit nachgewiesen. Die Schaumstabilität ist ausreichend. Es ist davon auszugehen, dass kein Schaum unkontrolliert durch die Ortsbrust, den Ringsspalt oder die Förderschnecke entweicht. Innerhalb der Abbaukammer entsteht ein homogenes 3-Phasen Gemisch bestehend aus Luft, Porenwasser und Feststoffpartikeln.

Grafik rechts Mitte

Mit zunehmender Vortriebsdauer und Bodenconditionierung sinkt die Anpresskraft des Schneidrades. Die Effektivität der Bodenconditionierung ist nachgewiesen. Dass die Vortriebsgeschwindigkeit nicht erhöht wird, liegt vermutlich an der zu hohen Schauminjektionsrate. Hierdurch wird die Materialförderung, insbesondere an der Übergabe Schnecken-Förderband sowie der Transport auf dem Förderband und die spätere Deponierung, behindert.

Grafik rechts unten

Der Drehmomentverlauf und die relativ geringe Vortriebspresenkraft bestätigen, dass die Prozesse Bodenabbau und Stützdruckkontrolle optimiert sind. Zur Optimierung des Prozesses Materialtransport kann folglich die Schauminjektionsrate reduziert werden. Hierdurch wird der Verflüssigung des Bodens entgegengewirkt.

7 WISSENSBASIERTE DATENANALYSE: ENTWICKLUNGSTRENDS

Während der letzten Jahre sind verschiedene Verfahren zur computerunterstützten und wissensbasierten Analyse großer Datenmengen entwickelt worden. Im Bereich der technischen Prozesskontrolle und -steuerung eignen sich besonders die Methoden der neuronalen Netzwerke und Fuzzy-Logik.

Fuzzy-Logik (unscharfe Logik) ermöglicht es, ingenieurmäßiges "know how" (Expertenwissen) aber auch Intuition bei der Datenanalyse und Prozesssteuerung zu berücksichtigen. Besonders vorteilhaft für den Einsatz beim Schildvortrieb erweisen sich die hervorragende Kompatibilität und Integrationsmöglichkeiten in standardisierte Regel- und SPS-Systeme (SPS=Speicherprogrammierbare Steuerungen).

Neuronale Netzwerke (NN) werden meist dann eingesetzt, wenn die Komplexität eines betrachteten Problems zu groß ist oder das Wissen zu unstrukturiert ist. Im Gegensatz zu konventionellen deterministischen Methoden wird hier auf eine geschlossene mathematische Modellierung des Systems verzichtet, d. h., dass keinerlei Aussagen über die Bedeutung der einzelnen Variablen oder ihre Interaktion notwendig sind.

Einfache statistische Methoden und die komplexeren Neuronalen Netzwerke (NN) können einen Beitrag zur Unterstützung der auswertenden Experten vor Ort leisten, da sich mit ihnen Zusammenhänge in unüberschaubar großen Datenmengen aufdecken und Vortriebsituationen simulieren lassen. Die Einsatzmöglichkeiten der statistischen Programme werden durch die Notwendigkeit, (vereinfachende) Annahmen hinsichtlich der Struktur der Zusammenhänge zu treffen, eingeschränkt. Der Einsatz der NN bietet sich gerade bei sehr komplexen, schwer zu formulierenden Problemen an, für die aber genug Beispieldaten vorliegen. Allerdings führt das erwähnte "black-box"-Verhalten, das einen manuellen Eingriff des Anwenders verhindert, zu nicht nachvollziehbaren Lösungswegen. In Bezug auf die automatische Verknüpfung von Maschinendaten mit Setzungsmesswerten verhindert der noch zu intensivierende Messaufwand bei der Erfassung der Setzungsdaten und der geomechanischen Parameter zur Zeit eine Realisierung.

Gerade die Methoden der Fuzzy-Logik sowie des Neuro-Fuzzy stellen für den maschinellen Tunnelvortrieb interessante Möglichkeiten dar, da sie es ermöglichen, das in der Praxis vorhandene Expertenwissen wie gezeigt in automatische Auswertungs- und Analyseverfahren zu implementieren. Da die so erstellten Systeme auf den dem menschlichen Denken entsprechenden linguistischen Beschreibungen und Regeln basieren, lassen sie sich nachvollziehen und manuell nachoptimieren. Des Weiteren bieten sie den Vorteil, dass sie leicht in die standardmäßig eingesetzte Hard- und Software der Regelkreise integriert werden können. Neben der Datenanalyse zur Vorgabe von Richtwerten sind so in Zukunft weitere Automatisierungen von Teilprozessen bis hin zu integralen Prozessleitsystemen denkbar.

8 ZUSAMMENFASSUNG

Beim modernen Schildvortrieb wird im Rahmen des Process-Controllings ein Soll-Ist-Vergleich gemessener Maschinendaten und geodätischer Messungen in Echtzeit mit den entsprechenden Prognosen aus vorangegangenen Berechnungen durchgeführt. Wesentliche Grundlage der Prognosen ist die genaue Kenntnis über das Systemverhalten, die Interaktion zwischen Schildmaschine und Baugrund.

Eine Möglichkeit zur Bestimmung der Soll-Werte und theoretischen Erfassung des Systemverhaltens besteht mittels dreidimensionaler Finite Elemente Berechnungen. Neben einer genauen Erfassung des Baugrunds kann hier beispielsweise der Stützdruck an der Ortsbrust, der Druck im Schildspalt und auch die Ringspaltverpressung detailliert simuliert werden. Allerdings werden bei einer FE-Simulation verfahrenstechnische Details wie beispielsweise die Bodenconditionierung oder die Vortriebsgeschwindigkeit nicht berücksichtigt. Diese Einflüsse und auch die Interaktion verfahrenstechnischer Teilprozesse können beispielsweise mittels wissensbasierter Methoden durch einen zeitsynchronen Soll-Ist-Vergleich erfasst und beurteilt werden. Weiterhin sind logistische Aspekte (z. B. Bodentransport und Deponierung) in das Controlling System einzubeziehen.

Zukünftige Entwicklungen zielen darauf ab, das Process-Controlling in die automatische Prozesssteuerung zu integrieren. Einen Ansatz könnten die wissensbasierten Methoden auf Basis der Fuzzy-Logic oder neuronalen Netzwerke darstellen. Sie bieten den Vorteil, dass sie leicht in die standardmäßig eingesetzte Hard- und Software der Regelkreise integriert werden können. Es muss allerdings vor zu viel Euphorie gewarnt werden. Häufig bleiben maßgebende Einflussparameter unberücksichtigt, da sie nicht oder nur sehr aufwändig erfassbar sind. Systeme auf Basis von Expertenwissen können niemals besser werden, als der Experte, der sie programmiert hat. Die Richtigkeit und Vollständigkeit der Regelbildung ist somit ständig zu überprüfen. Grundsätzlich sind jedoch in Zukunft weitere Automatisierungen von Teilprozessen bis hin zu integralen Prozessleitsystemen denkbar [3].

Literatur

- [1] *Maidl, U*: FEM-Simulation und wissensbasierte Entscheidungsfindung im Rahmen des Process-Controllings beim hoch mechanisierten Schildvortrieb. Vortrag Geotechnik Kolloquium Salzburg 2004, Salzburg, Österreich
- [2] *ÖNORM ENV 1997-1* (Eurocode 7: Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik)
- [3] *DIN1054*: Baugrund, Sicherheitsnachweise im Erd- und Grundbau
- [4] Sicherheitsmanagementplan Wienerwald Tunnel; HL-AG
- [5] *MAIDL, U*: Process-Controlling bei hoch mechanisierten Bauverfahren; Vortrag Ruhr-Universität Bochum, 2003
- [6] *MAIDL, U; NELLESSEN, PH.*: Zukünftige Anforderungen an die Datenaufnahme und -auswertung bei Schildvortrieben, Bauingenieur Ausg. 3, 2003
- [7] *MAIDL, U.*: Geotechnical and mechanical interactions using the earth-pressure balanced shield technology in difficult mixed face and hard rock conditions. Vortrag RETC 2003, New Orleans, Louisiana, 16.-18. Juni 2003
- [8] *MAIR, R.J., TAYLOR, R.N., BURLAND, J.B.*: Prediction of ground movements and assessment of risk of building damage due to bored tunnelling. In: Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground, Mair & Taylor (Edt.). Rotterdam. Balkema-Verlag 1996
- [9] *BOSCARDIN, M.D., CORDING, E.J.*: Building Response to Excavation-Induced Settlement, Journal of Geotechnical Engineering 114 (1989), Nr. 1, 1-21
- [10] *BRINKGREVE, R.B.J., BROERE, W. (EDT.)*: Handbuch: Plaxis 3D Tunnel – Version 2. Delft. Plaxis bv 2004
- [11] *MAIR, R.J., TAYLOR, R.N.*: Bored tunnelling in the urban environment. Proc. 14th Int. Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Hamburg. Vol. 4, 2353-2385. Rotterdam. Balkema-Verlag 1997
- [12] *KASPER, T., MESCHKE, G.*: A 3D finite element simulation model for TBM tunnelling in soft ground. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 28 (2004); 1441-1460

Autorenangaben

Dr.-Ing. Ulrich Maidl. ö.b.u.v. Sachverständiger der IHK Bochum für Tunnelbau und Mikrotunnelbau;
Teilhabender Geschäftsführer Ingenieurbüro Prof. Dr.-Ing. B. Maidl – Dipl.-Ing- R. Maidl
Beratende Ingenieure, Universitätsstrasse 142, 44799 Bochum.