

# **Simulationsgestützter Ansatz zur Verbesserung der Leistungsprognose maschineller Tunnelvortriebe mithilfe baubegleitender Prozessdaten**

## ***Simulation-based approach to enhance the performance prediction of mechanized tunneling using actual data during construction***

Annika Jodehl, Yara Salloum, Markus König, Markus Thewes, Ruhr-Universität  
Bochum, Bochum (Germany), annika.jodehl@rub.de, yara.salloum@rub.de,  
koenig@inf.bi.rub.de, markus.thewes@rub.de

**Abstract:** Performance prognoses in mechanised tunnelling are complex because production and support processes are closely interdependent while depending on typically highly variable ground conditions. Process simulation is a suitable tool to analyse these complex interrelationships. So far, developed simulation models were mainly aiming at planning phase. Extending the simulations towards integrating real-time data over the execution of a project could support continuous improvement of the models, decision-making in the event of unexpected disturbances and a robust incident management. In mechanised tunnelling, this is particularly interesting because in planning many input variables are based on assumptions and often subject to uncertainties and fuzziness and therefore deviate during execution. This paper presents an approach to update input data of simulation models using actual data during construction. By continuously adapting the model and analysing the impact on the project duration, the aim is to improve performance prediction and support decision making during construction.

## **1 Einleitung**

Die Leistungsprognose maschineller Tunnelvortriebe ist aufgrund vieler Prozessinteraktionen und der sich stetig ändernden Randbedingungen während des Vortriebs sowie der Variabilität des Baugrunds sehr komplex. Die Verfügbarkeit eines Vortriebs hängt dabei in einem hohen Maße von der Leistungsfähigkeit der Support- und Logistikprozesse sowie der Robustheit einzelner Abläufe gegenüber Leistungsschwankungen und ungeplanten Stillständen ab. Durch den Einsatz von Prozesssimulationen ist es möglich die Interaktionen der Prozesse zu untersuchen und leistungsmindernde Elemente zu identifizieren.

Im maschinellen Tunnelbau existieren bereits einige Simulationsansätze zur Analyse der Leistungsfähigkeit von Tunnelvortrieben. In den meisten Ansätzen werden jedoch die Produktions- und die Logistikprozesse getrennt voneinander betrachtet (Al-Bataineh et al., 2013; Ebrahimi et al., 2011). Eine konkrete Analyse der Interaktion der Logistikprozesse mit den Produktionsprozessen findet selten statt. Für die Modellierung solcher Prozessabläufe und -interaktionen werden im Bauwesen in der Regel ereignisdiskrete Simulationen eingesetzt (Akhavian und Behzadan, 2013). Die Eingangsdaten der Simulationen basieren oft auf Verteilungsfunktionen, um Schwankungen oder Unsicherheiten der Eingangsdaten (z.B. Prozessdauern, Ausfallwahrscheinlichkeiten) adäquat abzubilden. Die Anwendung dieser Simulationsansätze ist jedoch häufig auf die frühen Planungsphasen beschränkt und findet kaum Betrachtung in der Ausführung (Akhavian und Behzadan, 2013; Wu et al., 2019).

Eine Erweiterung der Simulationen um Komponenten zur Integration von Echtzeitdaten könnte eine kontinuierliche Verbesserung der Modelle, eine Entscheidungsfindung bei unerwarteten Stillständen während der Ausführung sowie ein robustes Störfallmanagement unterstützen. Im maschinellen Tunnelbau ist dies besonders interessant, da in der Planung viele Eingangsdaten auf Annahmen basieren und häufig mit Unsicherheiten und Unschärfen behaftet sind. Daher treten häufig Abweichungen während der Ausführungsphase auf. Zusätzlich werden die Annahmen der Eingangsdaten durch die gegebenen Randbedingungen und Baugrundverhältnisse des individuellen Projekts erschwert, welche prozessübergreifend im Vergleich zu anderen Bereichen der Baubranche besonders stark voneinander abhängen.

Dieser Beitrag stellt einen Ansatz zur Aktualisierung von stochastisch verteilten Eingangsdaten eines Simulationsmodells unter Verwendung von baubegleitenden Ist-Daten für den maschinellen Tunnelbau vor. Durch eine kontinuierliche Anpassung des Simulationsmodells und stetige Analyse der Auswirkungen auf die Projektdauer soll eine Verbesserung der Leistungsprognose und eine Unterstützung der Entscheidungsfindung während des Bauablaufs erzielt werden.

## **2 Grundlagen**

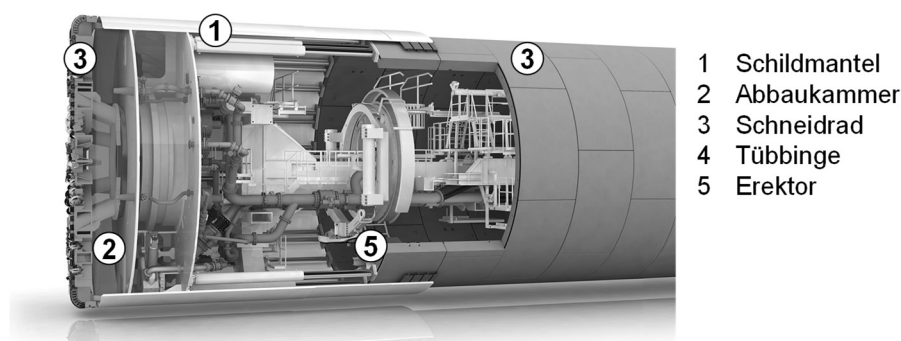
In diesem Abschnitt wird die Funktionsweise einer Tunnelbohrmaschine am Beispiel einer Schildmaschine mit flüssigkeitsgestützter Ortsbrust kurz beschrieben. Darauf folgt als Hintergrund für das vorgestellte Konzept zur Prognoseanpassung ein kurzer Überblick über Entwicklungen in der Echtzeitsimulation.

### **2.1 Maschineller Schildvortrieb**

Für Tunnelvortriebe in Lockergestein, in instabilen Baugrundverhältnissen oder unter dem Grundwasserspiegel werden Schildmaschinen eingesetzt. Schildmaschinen sind von einer zylindrischen Stahlkonstruktion, dem Schildmantel, umgeben, die den ausgebrochenen Hohlraum bis zum Einbau der endgültigen Tunnelsicherung stützt (Abb. 1). Bei Vortrieben mit nicht standfester Ortsbrust oder unterhalb des Grundwasserspiegels muss außerdem eine aktive Stützung der Ortsbrust erfolgen. Schildmaschinen mit einer flüssigkeitsgestützten Ortsbrust bringen diese Stützung durch eine unter Druck stehende Suspension in der Abbaukammer auf.

Der maschinelle Schildvortrieb besteht aus zwei alternierenden Kernprozessen, dem Vortrieb und dem Ringbau. Während des Vortriebs wird der Boden durch ein mit

Werkzeugen bestücktes Schneidrad abgebaut. Anschließend folgt die Sicherung des erzeugten Hohlrums mit Stahlbetonsegmenten, den sogenannten Tübbingen. Die Kernprozesse werden von zahlreichen Supportprozessen kontinuierlich unterstützt. Ein Ausfall einzelner Prozesse kann zu einem Ausfall des gesamten Vortriebs führen und durch Fortpflanzungseffekte weitere Störungen hervorrufen.



**Abbildung 1:** Aufbau einer Schildmaschine mit flüssigkeitsgestützter Ortsbrust (Herrenknecht AG, 2021)

Während des Vortriebs werden im maschinellen Tunnelbau durch eine Vielzahl von Sensoren große Datenmengen aufgezeichnet, um die Produktionsprozesse mithilfe eines Prozesscontrolling-Systems zu überwachen, zu bewerten und zu steuern. Sämtliche für den Vortrieb relevanten Maschinendaten wie die Penetration, die Vorschublänge oder der Stützdruck werden so erfasst. Weitere Datenquellen sind Schichtprotokolle, Daten aus dem Geomonitoring oder aus dem Werkzeugmanagement (Hegemann et al., 2020). Mithilfe von Datenmodellierungstechniken können diese Daten verwendet werden, um die Eingangsdaten für Logistiksimulationen zu verbessern, Muster und Zusammenhänge in den Daten für die Aktualisierung von Prognosen zu identifizieren.

## 2.2 Echtzeitsimulationen

In der Forschung werden in den letzten Jahren zunehmend Methoden zur Echtzeitsimulation untersucht. Auch im Bauwesen existieren erste Ansätze zur baubegleitenden Anwendung von Prozesssimulationen. Viele Ansätze beschäftigen sich speziell mit der Aktualisierung von Eingangsdaten, die mit Unsicherheiten behaftet sind. Zahlreiche Ansätze basieren dabei auf der Anwendung des Bayes'schen Theorems (Bradley et al., 2015; Wu et al., 2019). Das Bayes'sche Theorem erlaubt die Generierung einer neuen Verteilungsfunktion für die Prognose von Daten durch die Kombination neuer Beobachtungen mit einem a-priori Wissen. Das a-priori Wissen, bspw. die Informationen aus der Vorplanung, wird dabei in der Regel mit Wahrscheinlichkeitsverteilungen abgebildet, wodurch eine systematische Berücksichtigung von Unsicherheiten ermöglicht wird. Die Qualität der Ergebnisse ist jedoch in hohem Maß von der Wahl der a-priori-Verteilung abhängig. Bisher entwickelte Ansätze sind daher häufig nicht allgemein übertragbar.

Im Tunnelbau untersuchten Haas und Einstein (2002) die Anwendung des Bayes'schen Theorems für das Update des Decision Aid for Tunneling (DAT), einem Modell zur Prognose von Projektzeiten und Kosten unter Berücksichtigung von Unsicherheiten. Sie aktualisierten beispielhaft geotechnische Parameter und demonstrierten die Auswirkung der Aktualisierung an einem theoretischen Fallbeispiel. Chung T.H. et al. (2004) erforschten den Einsatz des Bayes'schen Theorems zur Aktualisierung der Penetrationsrate für die Simulation eines Tunnelvortriebs. Wu et al. (2019) untersuchten den Einsatz Bayes'scher Inferenzen gekoppelt mit Markov-Ketten, um den Einsatzbereich der Aktualisierungen durch das Bayes'sche Theorem zu erweitern. Durch die Koppelung der Markov-Ketten gelingt es, einen numerischen Ansatz für die Aktualisierung von Verteilungsfunktionen zu finden, bei welchen keine analytische Lösung möglich ist.

Andere Ansätze, wie die von Song und Eldin (2012), die die Methode der vorausschauenden Planung (Look-ahead scheduling) erforschten, sind meist auf einzelne Anwendungsfälle begrenzt und daher nicht für alle Anwendungen geeignet (Wu et al., 2019).

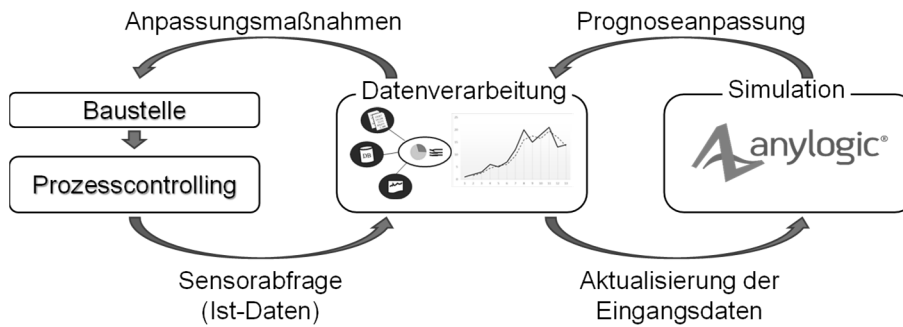
In diesem Beitrag wird ein ganzheitlicher Ansatz speziell für den Tunnelbau vorgestellt, welcher die Aktualisierung der Eingangsdaten unter Berücksichtigung von tunnelbauspezifischen Besonderheiten der Eingangsparameter ermöglicht.

### **3 Simulationsbasierte Prognoseanpassung**

In vorangegangener Forschung wurde ein Ansatz zum flexiblen Aufbau von ereignisdiskreten Simulationsmodellen zur Analyse von Produktionsvorgängen und Störungen im maschinellen Tunnelbau in der Planung entwickelt und in der Simulationssoftware AnyLogic implementiert (Scheffer et al., 2016; Rahm et al., 2015; Conrads et al., 2018). Dieser Simulationsansatz wird nun für eine baubegleitende Anwendung erweitert. Es wird ein Konzept zur kontinuierlichen Aktualisierung der Leistungsprognose eines Vortriebs während der Ausführungsphase vorgestellt und die Aktualisierung stochastisch verteilter Eingangsdaten thematisiert.

#### **3.1 Integration des aktuellen Baufortschritts**

Für eine baubegleitende, simulationsbasierte Prognoseanpassung ist eine Schnittstelle zwischen den aktuellen Ist-Daten der Baustelle und der Prozesssimulation erforderlich. Das entwickelte Konzept sieht dafür vor, die Ist-Daten der Baustelle, die i. d. R. in Echtzeit im Prozesscontrolling-System gespeichert werden, durch eine API-Anfrage eines online verfügbaren Servers kontinuierlich abzufragen und in einer separaten Datenbank zu speichern (Abb. 2). Eine zwischengeschaltete Datenverarbeitung greift auf diese Datenbank zu und ermöglicht eine Bearbeitung und Auswertung der projektspezifischen Ist-Daten. Sie bietet weiterhin die Möglichkeit, die stochastisch verteilten Eingangsdaten der Simulation durch die projektspezifischen Ist-Daten zu aktualisieren. Der aktuelle Baufortschritt wird über eine Verknüpfung der Parameter des Simulationsmodells mit der Datenbank automatisch und echtzeitnah integriert. Die Schnittstelle wurde von Salloum et al. (2020) verifiziert.



**Abbildung 2:** Schematischer Ablauf der vortriebsbegleitenden, simulationsgestützten Prognoseanpassung

Des Weiteren ist vorgesehen, dass die aktualisierte Prognose an die Datenverarbeitung zurückgegeben wird. Durch deren Analyse können neue Erkenntnisse gewonnen und ein vortriebsbegleitendes Störfallmanagement unterstützt werden.

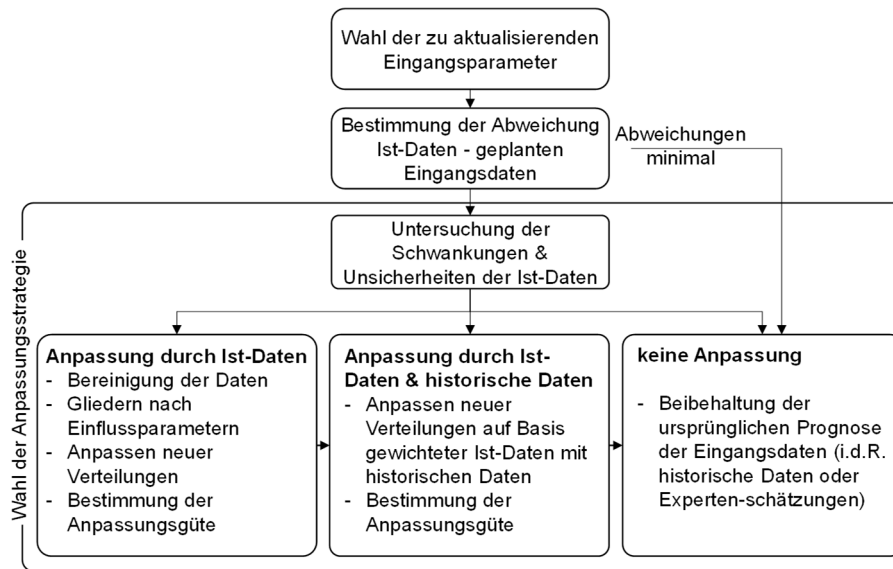
### 3.2 Anpassung der Eingangsdaten

Die Integration des aktuellen Baufortschritts in eine Simulation ist der erste Schritt zur Aktualisierung einer Leistungsprognose. Die Auswertung der projektspezifischen Ist-Daten des bisherigen Bauablaufs erlaubt außerdem eine Verbesserung stochastisch verteilter, in der Planung angenommener Eingangsdaten der Simulation.

Bei der Datenauswertung müssen die vorliegenden Ist-Daten gewisse Anforderungen erfüllen. Wichtige Anforderungen, die das VDI Zentrum Ressourceneffizienz formuliert, sind Aktualität, Nachvollziehbarkeit, Konsistenz, Eindeutigkeit und Vergleichbarkeit der Daten. Eine stetige Überprüfung der Daten auf diese Anforderungen ist unerlässlich.

Für die Anpassung der Eingangsdaten in dieser Arbeit werden die während des Bauablaufs erfassten Ist-Daten unter Berücksichtigung tunnelbau-spezifischer Kenntnisse statistisch ausgewertet (Abb. 3). Zunächst müssen hierfür die zu aktualisierenden Eingangsparameter gewählt werden. Eine vorherige Experteneinschätzung oder Sensitivitätsanalyse ist empfehlenswert für die Bestimmung der Parameter, welche den größten Einfluss auf das zu untersuchende System haben und demnach aktualisiert werden sollten. Eine Aktualisierung aller Parameter wird aufgrund der hohen Anzahl an Eingangsdaten nicht empfohlen (Salloum et al., 2020).

Die Bestimmung der Abweichung der Ist-Daten zu den zu aktualisierenden Eingangsdaten bildet den nachfolgenden Schritt. Tritt eine Abweichung auf, wird für jeden Parameter separat eine geeignete Anpassungsstrategie gewählt.



**Abbildung 3:** Baubegleitende Anpassung der Eingangsdaten anhand von aktuellen Ist-Daten

Im Tunnelbau sind viele Eingangsdaten abhängig von projektspezifischen Randbedingungen, die sich während des Vortriebs ändern können (bspw. Baugrundverhältnisse). Diese Einflussfaktoren müssen für die Anpassung der Eingangsdaten bestimmt und die Parameter den Einflussfaktoren entsprechend gegliedert angepasst werden. So ist es sinnvoll, die Vortriebsgeschwindigkeit für jede Bodenschicht einzeln zu aktualisieren und nicht pauschal für das gesamte Projekt eine Anpassung vorzunehmen. Eine vorherige Bereinigung der Daten um Werte, die auf einen Sensorausfall (Messfehler) schließen lassen, ist außerdem sinnvoll. Fehlenden Werte („missing values“) und Ausreißer in den Datensätzen gehören zu den nachträglich aus den Daten identifizierbaren Messfehlern. Um die Bereinigung von „echten“ Ausreißer, also Extremwerten zu vermeiden, schlagen die Autoren vor plausible Grenzwerte für die jeweiligen Parameter zu definieren und die Daten anhand dieser zu bereinigen.

Die Wahl der Anpassungsstrategie ist maßgeblich von der Verlässlichkeit der Ist-Daten, Schwankungen und Extremwerten sowie der Größe der erfassten Datenmenge abhängig und ist für jeden Parameter einzeln durchzuführen. Als Mindestgröße der Datenbasis sind in der Literatur Anhaltswerte von prozentual 9 % der gesamten Projektdaten bzw. absolut 50 Daten zu finden (Chung T.H. et al. 2004). Wichtig ist, dass die Datenbasis erwartete Schwankungen und Extremwerte der jeweiligen Prozessdaten enthalten. Die Berücksichtigung dieser sind für eine robuste Prognose und Planung sowie eine Abbildung von Leistungsspitzen essenziell. Ist für einen Parameter eine große Datenbasis vorhanden, die eine verlässliche Prognose des weiteren Projektablaufs erlaubt, können für die Aktualisierung der Eingangsdaten neue Verteilungsfunktionen rein auf Basis der Ist-Daten generiert werden. Die Anpassung neuer Verteilungsfunktionen an die Ist-Daten ist dabei kontinuierlich von der Überprüfung der Anpassungsgüte durch Anpassungstests (Goodness-of-fit tests)

zu begleiten. Bei einer unzureichenden Anpassungsgüte sollte eine andere Anpassungsstrategie gewählt werden.

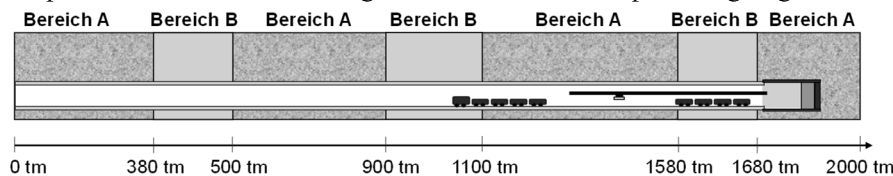
Ist die Datenbasis für eine ausreichend gute Anpassung zu gering, weisen die Ist-Daten zu große Schwankungen auf oder besitzen diese keine verlässliche Aussagekraft für den weiteren Projektablauf, müssen die Ist-Daten für eine robuste Aktualisierung um historische Daten oder Expertenschätzungen ergänzt werden.

Für manche Parameter wird empfohlen, trotz Abweichungen die ursprünglich angenommenen Verteilungen beizubehalten. Dies trifft auf Parameter zu, die selten auftreten oder dessen Einflussparameter großen Schwankungen unterliegen, sodass keine verlässliche Datenbasis für eine Anpassung besteht.

#### 4 Anwendungsbeispiel

Zur Demonstration und Evaluation des vorgestellten Konzepts wird der Vortrieb eines 2000 m langen Tunnels mit einem Durchmesser von 9 m, welcher mit einer TBM mit flüssigkeitsgestützter Ortsbrust aufgeföhren wird, simuliert. Der Vortrieb erfolgt in quartären Kies-Sand-Böden und durchfährt drei noch nicht ausgehobene Haltestellen. Eine Übersicht des Tunnels mit den zu durchörternden Bereichen ist Abbildung 4 zu entnehmen.

Im Rahmen des Anwendungsbeispiels werden die Daten eines abgeschlossenen Referenzprojekts verwendet. Die Eingangsdaten der Simulation basieren auf Daten aus der Vorplanung, auf historischen Daten und ingenieurtechnischen Annahmen. Für die Nachbildung der baubegleitenden Simulation wurden die Daten des Referenzprojekts in dem Rhythmus, in welchem sie in Echtzeit erfasst wurden, mithilfe von API-Anfragen aus einem Prozesscontrolling-System abgefragt und in Abhängigkeit des bekannten Baufortschritts in definierten Zeitabständen als quasi Echtzeiteingangswerte verwendet. So wurden die Randbedingungen einer baubegleitenden Simulation mit Echtzeit-Datenanbindung nachgebildet und das Beispiel konnte für die Evaluierung des entwickelten Konzepts herangezogen werden.



**Abbildung 4:** Übersicht des Anwendungsbeispiels mit Vortrieb zwischen den Haltestellen (Bereich A) und Durchörterung der Haltestellen (Bereich B)

Für die Anpassung der Eingangsdaten werden die Prozessdauern der beiden Kernprozesse Vortrieb und Ringbau in drei Schritten aktualisiert und der aktuelle Baufortschritt in das Simulationsmodell integriert.

Das Anwendungsbeispiel wurde unter Verwendung eines Multimethodenansatzes in der Simulationssoftware AnyLogic (The AnyLogic Company) implementiert. Eine detaillierte Beschreibung des verwendeten Modells ist bei Salloum et al. (2020) zu finden. Die Ergebnisse der Simulationsstudie werden zur Berücksichtigung der Unsicherheiten der Eingangsdaten durch Monte-Carlo-Simulationen erzeugt.

#### 4.1 Aktualisierung des Parameters Ringbaudauer

Die Ringbauzeit ist im Wesentlichen abhängig von dem Erfahrungs- und Einarbeitungsgrad des Personals und von projektspezifischen Randbedingungen wie bspw. der Anzahl und Größe der Tübbinge je Ring oder der Präzision und Geschwindigkeit des Erektors (Maidl und Wingmann, 2009). Die projektspezifischen Faktoren sind innerhalb eines Projekts konstant. Der Einarbeitungsgrad verändert sich jedoch mit Projektfortschritt und muss bei der Aktualisierung berücksichtigt werden. Abhängig vom Einarbeitungsgrad müssen die aktuellen Ist-Daten gefiltert und entsprechend angepasst werden.

Maidl und Wingmann (2009) nennen Richtwerte für Ringbauzeiten in Abhängigkeit der Tunnellänge basierend auf Referenzprojekten. Angelehnt an diese Werte werden in diesem Anwendungsbeispiel vereinfacht drei Bereiche definiert, die den Einarbeitungseffekt widerspiegeln. Der Einarbeitungsbereich 1 wird für den Vortrieb von 0 bis 200 Tunnelmetern (tm) definiert, der zweite Einarbeitungsbereich wird bis zu einer Tunnellänge von 500 tm definiert. Ab einer Tunnellänge von 500 tm wird angenommen, dass die Einarbeitung abgeschlossen ist und ein Regelbetrieb stattfindet.

Für die einzelnen Aktualisierungsschritte wurden die zu dem jeweiligen Zeitpunkt vorliegenden Ist-Daten in diese drei Bereiche unterteilt und Ausreißer, die auf einen Sensorausfall schließen lassen, bereinigt. Zur Erkennung von Ausreißern wurden vorab Grenzwerte für plausible Prozesszeiten definiert. Die Grenzwerte berücksichtigen dabei mögliche Extrema. Anschließend wurden neue Verteilungsfunktionen für die jeweiligen Bereiche an die aktuellen Ist-Daten angepasst (Tab. 1) und die Anpassungsgüte durch Anpassungstests (Chi<sup>2</sup>-Test, Kolmogorov-Smirnov-Test, Anderson-Darling-Test) überprüft. Die Leistungsprognose wurde dann durch die Integration des aktuellen Baufortschritts sowie der aktualisierten Verteilungen in der Simulation aktualisiert.

**Tabelle 1:** Anpassung des Parameters Ringbaudauer [min] im Einarbeitungsbereich 1 (bis 200 tm), Einarbeitungsbereich 2 (bis 500 tm) und Regelbetrieb (ab 500 tm)

Aktualisierungsschritt	Verteilung	Parameter
Planung	Bereich 1:	Weibull (E) loc = 20.78; $\alpha = 3.399$ ; $\beta = 53.87$
	Bereich 2:	Weibull loc = 0.689; $\alpha = 3.406$ ; $\beta = 53.975$
	Regelbetrieb:	Weibull loc=16.776; $\alpha = 13.035$ ; $\beta = 2.152$
1. Update (500 tm)	Bereich 1:	Log-Logistic(E) loc = 19.547; $\alpha = 24.459$ ; $\beta = 2.486$
	Bereich 2:	Log-Logistic(E) loc = 16.776; $\alpha = 13.035$ ; $\beta = 2.152$
	Regelbetrieb:	keine Anpassung -
2. Update (1000 tm)	Bereich 1:	s. Update 1 -
	Bereich 2:	s. Update 1 -
	Regelbetrieb:	Lognormal $\mu = 2.532$ ; $\sigma = 0.830$ ; min = 15.108
3. Update (1500 tm)	Bereich 1:	s. Update 1 -
	Bereich 2:	s. Update 1 -
	Regelbetrieb:	Johnson SB LEP = 14.883; UEP = 505.005; $\alpha = 4.552$ ; $\beta = 1.236$



## 4.2 Aktualisierung des Parameters Vortriebsgeschwindigkeit

Die Vortriebsgeschwindigkeit wird maßgeblich von den geologischen Randbedingungen und den angetroffenen Baugrundverhältnissen beeinflusst. Die Anpassung der Vortriebsgeschwindigkeit erfolgt demnach je Bodenschicht.

In dem Anwendungsbeispiel werden auf der freien Tunnelstrecke zwischen den Haltestellen vergleichbare Bodenverhältnisse angenommen. Bei der Durchörterung der Haltestellen ist jedoch eine erhebliche Reduzierung der Vortriebsgeschwindigkeit vorgeschrieben. Daraus ergeben sich zwei Bereiche, für die jeweils zwei unterschiedliche Verteilungen der Vortriebsgeschwindigkeit angenommen werden.

Äquivalent zu dem Vorgehen der Anpassung der Ringbaudauer werden für die Aktualisierungsschritte die aktuellen Ist-Daten der Vortriebsgeschwindigkeit in die Bereiche A (zwischen den Haltestellen) und B (Durchörterung der Haltestellen) unterteilt und die Verteilungsfunktionen für diese Bereiche je nach bekanntem Baufortschritt aktualisiert. Die aktualisierten Verteilungen für die Anpassungsschritte sind in Tabelle 2 dargestellt.

**Tabelle 2:** Anpassung der Eingangsdaten Vortriebsgeschwindigkeit [mm/min] im Bereich A zwischen den Haltestellen und Bereich B Durchörterung der Haltestellen

Aktualisierungsschritte	Verteilung	Parameter
Planung	Bereich A: Beta	$\alpha_1 = 15.690$ ; $\alpha_2 = 10.426$ ; LEP = 20.639; UEP = 69.518
	Bereich B: Beta	$\alpha_1 = 15.639$ ; $\alpha_2 = 10.396$ ; LEP = 0.688; UEP = 49.493
1. Update (500 tm)	Bereich A: JohnsonSB	$\alpha_1 = -1.152$ ; $\alpha_2 = 1.170$ ; LEP = 0.075; UEP = 56.835
	Bereich B: Log- Logistics(E)	loc = 12.172; $\alpha = 11.759$ ; $\beta = 4.135$
2. Update (1000 tm)	Bereich A: Weibull	loc = 0; $\alpha = 44.841$ ; $\beta = 6.186$
	Bereich B: Weibull (E)	loc = 4.458; $\alpha = 17.220$ ; $\beta = 2.490$
3. Update (1500 tm)	Bereich A: Weibull (E)	Loc = 13.360; $\alpha = 30.433$ ; $\beta = 4.521$
	Bereich B: s. 2. Update	-

## 4.3 Ergebnisse

Für die Auswertung der einzelnen Aktualisierungsschritte werden die Summen der Vortriebsdauer, der Ringbaudauer und die prognostizierte Projektzeit gegenübergestellt (Tab. 3).

**Tabelle 3:** Ergebnisse der Simulationsstudie

Aktualisierung	Vortriebsdauer [d]	Ringbaudauer [d]	Projektzeit [d]
Prognose Planung	33,02	29,14	121,04
1. Update (500 tm)	46,05	27,38	155,86
2. Update (1000 tm)	44,11	25,76	270,10
3. Update (1500 tm)	43,23	24,82	291,37
Ist-Daten	42,77	23,63	305,00

Der Vergleich der Aktualisierung der prognostizierten Projektzeit zeigt eine signifikante Verbesserung bereits ab dem zweiten Aktualisierungsschritt. Das Ausmaß der Verbesserung ist nicht nur auf die Aktualisierung der Parameter Vortriebsgeschwindigkeit und Ringbaudauer zurückzuführen, sondern auch auf die Integration des aktuellen Baufortschritts in die Simulation. Mit fortschreitender Projektzeit reduzieren sich zunehmend die Unsicherheiten der weiteren Prognose, unvorhergesehene Stillstände finden in der Prognose außerdem nachträglich Berücksichtigung.

Der reine Effekt der Anpassung der Verteilungsfunktionen für die Ringbaudauer und die Vortriebsgeschwindigkeiten zeigt sich bei der Prognose der jeweiligen Prozessdauern. Dieses Ergebnis unterstreicht, dass nicht nur eine Integration des aktuellen Baufortschritts, sondern auch die gezielte, baubegleitende Anpassung der Eingangsdaten einer Simulation essenziell für eine verbesserte Prognose ist.

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

Die Aktualisierung eines Simulationsmodells mit aktuellen Ist-Daten während des Bauablaufs ermöglicht eine kontinuierliche Verbesserung der Leistungsprognose. In diesem Paper wurde ein Konzept vorgestellt, welches die baubegleitende Aktualisierung einer Simulation mit aktuellen Ist-Daten unter Berücksichtigung tunnelspezifischer Kenntnisse ermöglicht. Ein erstes Anwendungsbeispiel zeigt die Verbesserung der Leistungsprognose durch die Integration des aktuellen Baufortschritts und die Aktualisierung der stochastischen Eingangsdaten für die Kernprozessdauern Vortrieb und Ringbau.

Für die Integration von Ist-Daten in Simulationen ist eine Datenbasis, die vortriebsbegleitend in Echtzeit verfügbar ist, essenziell. Die Heterogenität der Datenquellen im Tunnelbau (Maschinendaten, Schichtprotokolle etc.) stellt hier immer noch eine Herausforderung dar. Durch die fortschreitende Digitalisierung der Baustellen werden jedoch zunehmend digitale, offene Lösungen für die Organisation und Speicherung heterogener Daten entwickelt. Hegemann et al. (2020) stellen bspw. einen integralen Ansatz zur Verknüpfung unterschiedlicher Datenquellen und Bereitstellung der Daten vor. Für weitere Forschung sollte die Kopplung eines solchen Ansatzes an die baubegleitende Simulation untersucht werden.

Die Aktualisierung weiterer Parameter und die Untersuchung der Auswirkungen dieser auf das Gesamtsystem stellen die nächsten Forschungsziele dar. Der Einsatz der baubegleitenden Simulation zur Unterstützung eines vortriebsbegleitenden Störfall-managements wird außerdem angestrebt.

## Danksagung

Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgesellschaft (DFG) für die finanzielle Förderung dieser Arbeit im Rahmen des Teilprojekts C3 des Sonderforschungsbereichs SFB 837 „Interaktionsmodelle für den maschinellen Tunnelbau“.

## Literatur

- Akhavian, R.; Behzadan, A.H.: Knowledge-Based Simulation Modeling of Construction Fleet Operations Using Multimodal-Process Data Mining. *Journal of Construction Engineering and Management* 139 (2013) 11.
- Al-Bataineh, M.; AbouRizk, S.; Parkis, H.: Using Simulation to Plan Tunnel Construction. *Journal of Construction Engineering and Management* 139 (2013) 5, S. 564–571.
- Bradley, R.; Bergmann, J.J.; Noble, J.S.; McGarvey, R.G.: Evaluating a bayesian approach to demand forecasting with simulation. *Proceedings of the 2015 Winter Simulation Conference* (2015).
- Chung T.H.; Mohamed Y.; AbouRizk S.M. (Hrsg.): *Simulation Input Updating using Bayesian Techniques* 2004.
- Conrads, A.; Scheffer, M.; König, M.; Thewes, M.: Robustness evaluation of cutting tool maintenance planning for soft ground tunneling projects. *Underground Space* 3 (2018) 1, S. 72–85.
- Ebrahimi, Y.; AbouRizk, S.M.; Fernando, S.; Mohamed, Y.: *Symphony Supply Chain Simulator*. *SIMULATION* 87 (2011) 8, S. 657–667.
- Haas, H.; Einstein, H.H.: Updating the Decision Aids. *Journal of Construction Engineering and Management* (2002) 128, S. 40–48.
- Hegemann, F.; Stascheit, J.; Maidl, U.: Digitalisierung und IoT im maschinellen Tunnelbau – Ein integraler Ansatz. *Geomechanics and Tunnelling* 13 (2020) 4, S. 406–420.
- Herrenknecht AG, 2021: Herrenknecht AG. Online verfügbar unter <https://www.herrenknecht.com/de/produkte/productdetail/mixschild/>, zuletzt geprüft am 05.05.2021.
- Maidl, U.; Wingmann, J.: Leistungsprognose von Erddruckschilden im Lockergestein. *Geomechanics and Tunnelling* 2 (2009) 2, S. 189–197.
- Rahm, T.; Scheffer, M.; Thewes, M.; König, M.; Duhme, R.: Evaluation of Disturbances in Mechanized Tunneling Using Process Simulation. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering* 31 (2015) 3, S. 176–192.
- Salloum, Y.; Jodehl, A.; Thewes, M.; König, M.: From Forecasting to real-time process controlling with continuous simulation model updates. *Proceedings of the 37th International CIB W78 Conference* (2020).
- Scheffer, M.; Rahm, T.; König, M.; Thewes, M.: Simulation-Based Analysis of Integrated Production and Jobsite Logistics in Mechanized Tunneling. *Journal of Computing in Civil Engineering* 30 (2016) 5, C4016002.

Song, L.; Eldin, N.N.: Adaptive real-time tracking and simulation of heavy construction operations for look-ahead scheduling. *Automation in Construction* 27 (2012), S. 32–39.

The AnyLogic Company: <http://www.anylogic.com/>: 8.5.2 University.

VDI Zentrum Ressourceneffizienz: Grundlagen zur Echtzeitdatenerfassung und -verarbeitung, VDI Zentrum Ressourceneffizienz. Online verfügbar unter <https://www.ressource-deutschland.de/themen/echtzeitdaten/grundlagen/>, zuletzt geprüft am 02.07.2021.

Wu, L.; Ji, W.; AbouRizk, S.M.: Bayesian Inference with Markov Chain Monte Carlo-Based Numerical Approach for Input Model Updating. *Journal of Computing in Civil Engineering* 34 (2019).