

Prozesssimulation für maschinelle Tunnelvortriebe – Leistungsanalysen unter Berücksichtigung von Logistik, Wartung und Störungen

Prof. Dr.-Ing. M. Thewes, MSc Alena Conrads

Lehrstuhl für Tunnelbau, Leitungsbau und Baubetrieb, Ruhr-Universität Bochum

Prof. Dr.-Ing. Markus König, MSc Markus Scheffer

Lehrstuhl für Informatik im Bauwesen, Ruhr-Universität Bochum

ETH Zürich, Kolloquium Maschinelle Vortriebe, 18.05.2017

Zusammenfassung

Die Vortriebsleistung im maschinellen Tunnelbau ist in starkem Maße von der Leistungsfähigkeit der damit verbundenen Prozesskette abhängig. Dabei haben Stillstandszeiten durch Störungen des Vortriebssystems teilweise ein deutlich höheres Verbesserungspotenzial als eine Erhöhung der Vortriebsgeschwindigkeit oder eine Verkürzung der Ringbauzeit. Zur Gewährleistung eines störungsarmen Bauprozesses ist die detailgenaue Planung der einzelnen Systemkomponenten, insbesondere der Logistikkette, sowie der Wartungsarbeiten, unabdingbar. Durch das komplexe Ineinandergreifen der verschiedenen Prozesse und die daraus folgende mögliche Fortpflanzung von Störungen, ist die Identifikation einer Stillstands-Ursache während der Planungsphase mit den bisher üblichen deterministischen Methoden zur Leistungsermittlung kaum möglich. Die Prozesssimulation ist eine effiziente Methode, um die einzelnen Komponenten und deren Wechselwirkungen untereinander zu modellieren und zu analysieren. In diesem Beitrag wird aufgezeigt, wie ein Simulationsmodell erstellt und zur Leistungsermittlung verwendet werden kann. Dazu wird eine Analyse von Stillstandszeiten durchgeführt, um die Alternativen für eine Baustellenlogistik zu vergleichen. Dieser Beitrag zum ETH-Kolloquium Maschinelle Vortriebe basiert auf den Beiträgen von König et al. [1], Thewes et al. [2] und Conrads et al. [3].

1 Einleitung

Die Produktivität eines maschinellen Tunnelvortriebs ist im starken Maß von zwei Faktoren Abhängig: Der Leistungsfähigkeit der Logistikkette und der Reduzierung der Stillstandszeiten. Der Baufortschritt von Projekten ist somit nicht ausschließlich von der Vortriebsleistung der eingesetzten Tunnelvortriebsmaschine (TVM) abhängig, sondern wird besonders von der Leistungsfähigkeit der Support- und Logistikprozesse sowie von der Robustheit der Abläufe gegenüber auftretenden Leistungsschwankungen und ungeplanten Störeinflüssen bestimmt.

Das komplexe Zusammenspiel der vielfältigen Komponenten muss auf die sich verändernden Randbedingungen angepasst werden. Die Leistungen der jeweiligen Maschinenelemente und Prozesse müssen unter unsicheren und dynamischen Gegebenheiten ermittelt werden. Die konventionelle Auslegung der einzelnen Maschinenkomponenten auf Basis fixer Mittel- oder Spitzenwerte kann zu einer unzureichenden Auslegung, insbesondere der Versorgungskette, führen. Die Interaktionen und Abhängigkeiten einzelner Systemkomponenten findet bei der klassischen Leistungsermittlung nur im geringen Maße Berücksichtigung. Dies führt vielfach zu einem auf Leistungsschwankungen sehr sensitiv reagierenden Bauablauf.

Zusätzlich erschweren diese komplexen Prozessabhängigkeiten während der Ausführungsphase die Identifikation der leistungsreduzierenden Elemente. Daher sollten solche Abhängigkeiten bereits bei der Planung erkannt und berücksichtigt werden. Die Analyse der Auswirkungen von Leistungsschwankungen auf den Baufortschritt unter Berücksichtigung der Prozessabhängigkeiten ermöglicht einen bestmöglichen Ressourceneinsatz. Diese Leistungsschwankungen und Wechselwirkungen bleiben in den statischen und isolierten Betrachtungsweisen zur Leistungsermittlung einzelner Systemkomponenten bislang unberücksichtigt.

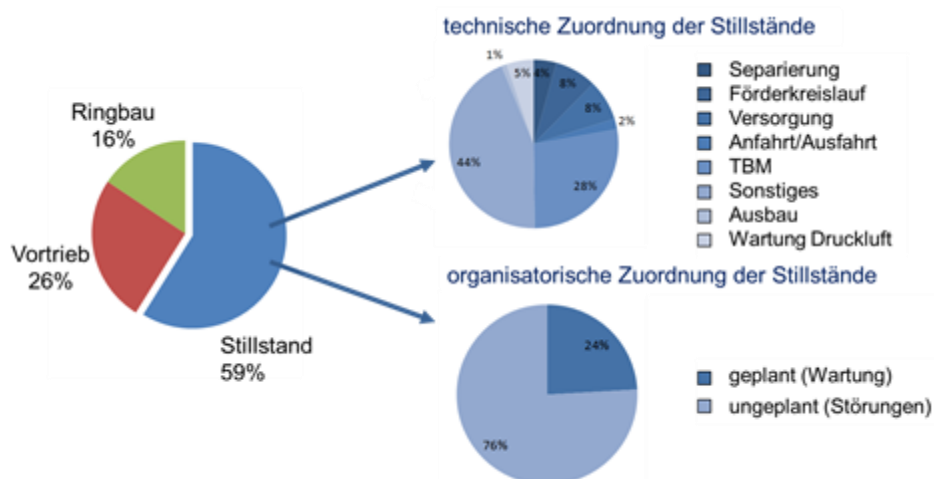


Abbildung 1: Analyse und Zuordnung der Stillstände eines Tunnelbauprojekts

Störungen mindern, wie in Abbildung 1 zu erkennen ist, die Leistungsfähigkeit des gesamten Systems. Um diese Form von ungeplanten Stillständen zu vermeiden, kann ein Wartungskonzept entwickelt werden, das mit Hilfe geplanter Stillstände die Gesamtdauer der Unterbrechungen reduziert und gleichzeitig die Kosten für Reparaturen verringert. Insbesondere die Inspektion und Wartung der Abbauwerkzeuge ist aufgrund der oft schwierigen Zugänglichkeit sehr aufwendig und zeitintensiv und muss daher möglichst optimal geplant werden.

Erste Untersuchungen zur Leistungsermittlung eines Erddruckschildes von Maidl und Wingmann [4] zeigen, dass eine deterministische mathematische Formulierung der Leistungsprognose die tatsächlichen Gegebenheiten nur unzureichend abbilden kann. Stattdessen muss das komplexe Gesamtsystem analysiert werden, um eine möglichst genaue Abschätzung der unbekanntem und unscharfen Parameter und somit eine realitätsnahe Prognose der Vortriebsleistung zu erhalten. Für Festgestein gibt Leitner [5] einen ersten Ansatz für die Abhängigkeiten der Prozesse im konventionellen sowie maschinellen Tunnelbau und den Einfluss dieser Abhängigkeiten auf die Leistung des Gesamtsystems. Duhme et al. [6] geben einen Überblick über die gängigen Methoden der Leistungsermittlung im maschinellen Tunnelbau und zeigt vor allem die Notwendigkeit einer genaueren Prozessanalyse für die Logistik einer Tunnelbaustelle auf.

2 Besonderheiten im maschinellen Tunnelbau

Die Analysen von Stillstandszeiten beim maschinellen Tunnelbau zeigen drei wesentliche Faktoren auf, welche die Produktivität beeinflussen: Die Logistik, technische Störungen und die Wartung, insbesondere der Abbauwerkzeuge.

2.1 Logistik

Mit Hilfe der Logistik wird der Material- und Informationsfluss eines Systems realisiert. Das Ziel der Logistik ist, die richtigen Materialien mit möglichst geringem Aufwand zur richtigen Zeit am richtigen Ort zur Verfügung zu stellen. Vor allem in der Fabrikproduktion werden logistische Prozesse immer weiter angepasst und optimiert, um die Produktivität des Gesamtsystems zu steigern. Im Bauwesen kann die Logistik in drei Teilbereiche unterteilt werden: Beschaffungslogistik, Produktionslogistik und Entsorgungslogistik [7]. Dabei beinhalten die Beschaffungs- und die Entsorgungslogistik die externe Andienung der Baustelle mit Materialien sowie den Abtransport von Abraum und Baureststoffen. Die Produktionslogistik betrachtet hingegen die logistischen Vorgänge auf der Baustelle selbst.

Der maschinelle Tunnelbau weist einen sehr hohen Mechanisierungsgrad auf, der mit seinen alternierenden Kernprozessen, dem Vortrieb und dem Ringbau, einer fabrikartigen Produktion ähnelt. Allerdings unterscheidet sich der Tunnelvortrieb nicht nur durch dynamische Randbedingungen wie der stetig zunehmenden Tunnellänge von der Logistik der stationären Produktion. Insbesondere unsichere Parameter, insbesondere die Standfestigkeit, die Lösbarkeit sowie die Abrasivität des Baugrunds, führen zu starken Schwankungen der Vortriebsleistungen und somit auch zu variablen Anforderungen an die Leistung der Logistikkomponenten.

Viele maschinelle Tunnelvortriebe finden im 24 h Dauerbetrieb statt, in dem bis auf Wartungspausen kontinuierlich ohne Unterbrechung gearbeitet wird. Störungen, die sich direkt oder auch indirekt auf die Kernprozesse auswirken und diese unterbrechen, haben somit immer

eine Verzögerung des Gesamtprojekts zur Folge. Auch geplante Unterbrechungen für Wartungsarbeiten führen zwangsläufig zu einer Verlängerung der Projektgesamtdauer und müssen daher möglichst effizient geplant werden, sodass die Dauer und der Aufwand für Stillstände möglichst gering bleiben.

Im theoretischen Idealfall würde sich die Projektdauer aus der summierten Dauer der Vortriebs- und Ringbauzyklen sowie unvermeidliche Wartungs- und Zusatzarbeiten, wie z.B. Kabel- und Rohrverlängerungen, zusammensetzen. In Realität wird jedoch häufig beobachtet, dass ein großer Anteil der Projektdauer Stillständen zuzuordnen sind, die durch eine unzureichende Andienung der TVM mit Materialien sowie weiteren Störungen in der Versorgungskette verursacht werden.

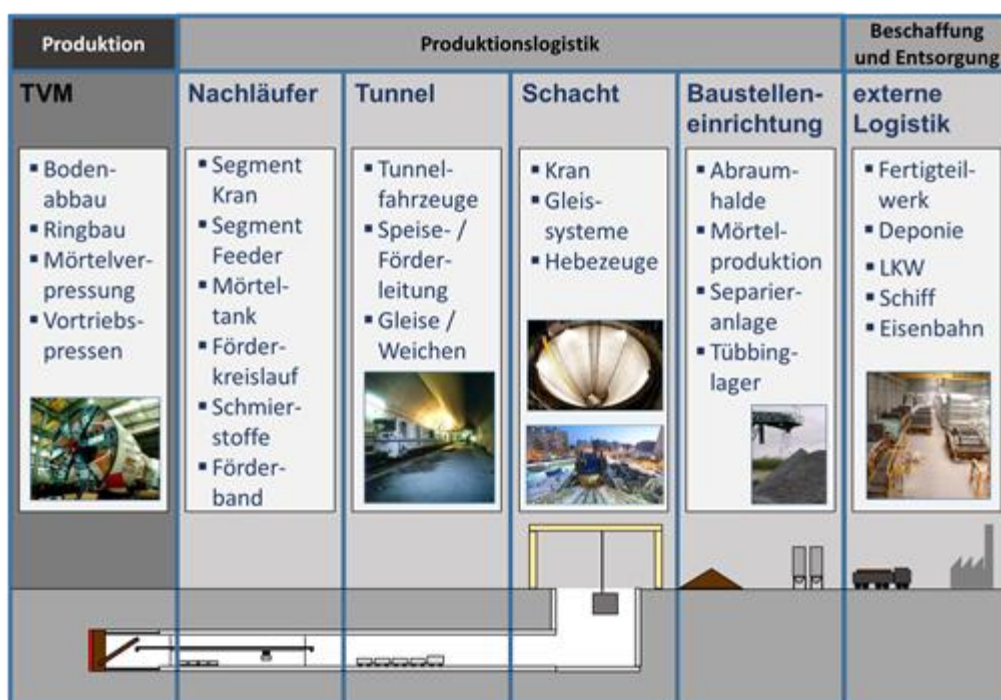


Abbildung 2: Prozesse einer Tunnelbaustelle im maschinellen Vortrieb

Ein grober Überblick über die erforderlichen Teilprozesse des maschinellen Tunnelbaus ist in Abbildung 2 gegeben. Die leistungsbestimmenden Prozesse Vortrieb und Ringbau finden auf der TVM statt. Die Supportprozesse, die zur Andienung der TVM mit Tübbing und Verpressmörtel sowie zum Abtransport des abgebauten Bodens benötigt werden, müssen an die Leistung der Kernprozesse angepasst werden. Sie lassen sich räumlich in Prozesse auf dem Nachläufer, im Tunnel, im Schacht, auf der Baustelle über Tage und in Prozesse der externen Logistik aufteilen. Dabei gibt es nicht nur eine Vielzahl an verschiedenen Elementen, deren Leistung auf die Vortriebsleistung angepasst werden muss, sondern vor allem müssen die Interaktionen der Elemente aufeinander abgestimmt werden.

2.2 Einfluss von Störungen

Beim maschinellen Tunnelvortrieb können vielfältige Probleme und Störungen auftreten, welche zu Verzögerungen im Ablauf und zu kompletten Stillständen führen. Neben den Störungen aus einer nicht hinreichenden Logistik werden zusätzlich technische Störungen der Produktion und deren Fortpflanzung im System untersucht.

Störungen der eigentlichen Produktionsprozesse, in diesem Fall der Vortriebs- und Ringbauprozesse, führen zu einem augenblicklichen Stillstand der Vortriebsmaschine. Diese Störungen technischer Komponenten treten über die Projektlaufzeit stochastisch verteilt auf. Für ihre Abbildung sind Verteilungen von zwei Kennwerten erforderlich: Time Between Failure (TBF – Zeit zwischen zwei Störungen) und Time To Recover (TTR – Dauer der Störung). Diese Faktoren müssen auf der Grundlage von Messungen oder Schätzungen für jede Störung angegeben werden.

In bestimmten Fällen führen Störungen eines Elements in der Produktionskette durch Fortpflanzungseffekte auch zu nachfolgenden Problemen bei anderen Systemkomponenten. Solche Fortpflanzungseffekte sind schwierig zu identifizieren, da diese erst bei einer bestimmten Intensität oder Dauer einer initialen Störung ausgelöst werden. Interaktionen zwischen unterschiedlichen Elementen spielen im Kontext von Fortpflanzungseffekten eine entscheidende Rolle. Ein typisches Beispiel für eine Störung, die durch eine vorherige Störung hervorgerufen wird tritt bei der Ringspaltverpressung auf. Der Ringspaltmörtel muss innerhalb seiner zulässigen Verarbeitungszeit verwendet werden. Falls an der TVM eine längere Störung auftritt und infolge dessen die Verarbeitungsdauer des Mörtels überschritten wird, muss der auf der TVM gelagerte Mörtel entsorgt, das Verpresssystem gereinigt und anschließend neuer Mörtel gemischt und geliefert werden. Solange kein Mörtel verfügbar ist, darf der Vortrieb nicht fortgesetzt werden. Folglich kann auch nach Behebung der initialen Störung der TVM noch eine weitere durch Fortpflanzungseffekte hervorgerufene Störung des Verpresssystems vorliegen.

2.3 Wartung der Abbauwerkzeuge

Die Wartung der Abbauwerkzeuge beeinflusst maßgeblich die Produktivität eines Tunnelbauprojekts. Sie ist nicht nur besonders aufwendig, sondern auch schwierig zu planen, da sie vielen Unsicherheiten unterliegt. Um die Wartung im Simulationsmodell berücksichtigen zu können, müssen zunächst die Prozesse der Wartungsarbeiten analysiert und die Randbedingungen identifiziert werden.

Für die Planung der Wartungsintervalle ist nicht nur der zu erwartende Verschleiß entscheidend. Aus den Gegebenheiten vor Ort sowie der eingesetzten Technik ergeben sich weitere Randbedingungen, die in der Planung berücksichtigt werden müssen (Abbildung 3).

Entlang des Tunnellängsschnitts gibt es verschiedene Bereiche, in denen ein Einstieg in die Abbaukammer möglichst vermieden werden sollte. Um die Abbaukammer für die Wartungs-

arbeiten zugänglich zu machen, muss das Stützmedium abgelassen und durch Druckluft ersetzt werden. Bei stark durchlässigen Böden besteht dabei die Gefahr eines Ausblägers und somit dem Versagen der Ortsbrust und dem Entstehen von Setzungen an der Oberfläche [8]. Daher sollte insbesondere im Bereich von setzungsempfindlicher Oberflächenbebauung ein Einstieg möglichst vermieden werden.

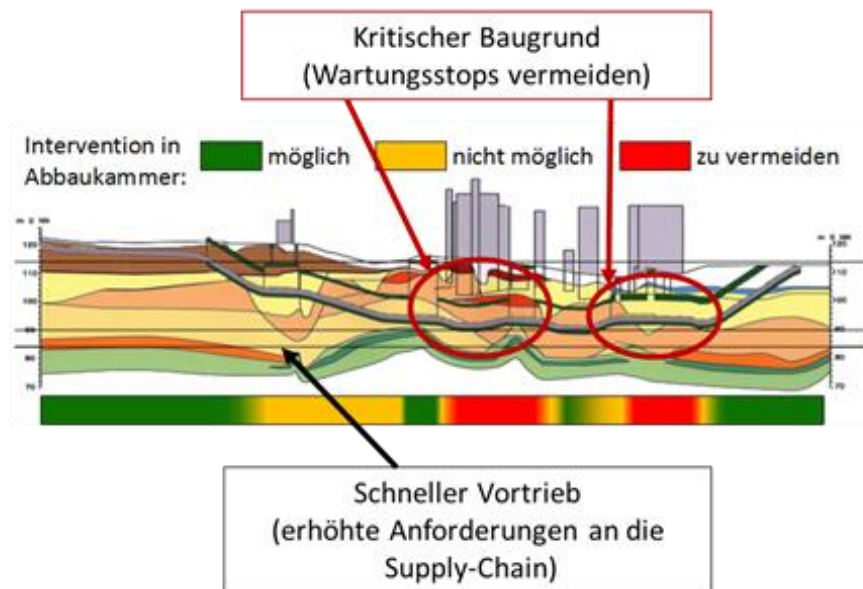


Abbildung 3: Beispielhafte Randbedingungen für die Planung von Vortrieb und Wartung

Hohe Erd- und Wasserdrücke erfordern einen entsprechend hohen Stützdruck. Dieser hohe Druck führt aufgrund arbeitsschutzrechtlicher Regelungen zu einem erhöhten Aufwand für die Wartungsarbeiten. Ab einem Druck von 3,6 bar ist der Einstieg in die Abbauebene ohne Zusatzmaßnahmen nicht mehr möglich. Außerdem nimmt mit steigendem Druck, entsprechend der Druckluft-Verordnung [9], die maximal erlaubte Arbeitszeit unter Druckluft ab und die notwendige Zeit zum Ausschleusen nimmt zu, vgl. auch Holzhäuser et al. [10].

Tunnelabschnitte in denen ein hoher Wasserdruck und erhöhte Ausbläsergefahr vorliegt, befinden sich häufig im Bereich von Unterquerungen von Gewässern. In Tunnelabschnitten ohne sensible Überbauung, in denen der Baugrund standfest ist und geringe Drücke vorherrschen, sind für Wartungseinstiege bevorzugt geeignet.

Auch Durchquerungen von Haltestellen sind gesondert zu betrachten. Wird die Baugrube vor dem Durchqueren ausgehoben, sind die Abbauebenen in dem Haltestellenbereich frei zugänglich und können inspiziert und gewartet werden. Allerdings ist zu beachten, dass beim Durchfahren der Verbauwand noch ein ausreichend großer Überschneidungsbereich vorhanden ist, um ein Feststecken des Schildes zu vermeiden. Außerdem entsteht beim Durchfahren der Wand tendenziell ein größerer Verschleiß an den Abbauebenen.

Somit lässt sich der Tunnellängsschnitt anhand der geologischen sowie hydrologischen Verhältnisse in Homogenbereiche einteilen, in denen ein Einstieg in die Abbaukammer technisch besser umsetzbar ist und in Abschnitte, in denen ein Einstieg einen erhöhten Aufwand oder ein erhöhtes Risiko für Setzungen, Ausbläser und somit eine Gefährdung der Arbeiter besteht.

3 Prozesssimulation im maschinellen Tunnelbau

Die Prozesssimulation ist eine bewährte Methode, um die Interaktion der einzelnen Komponenten eines Produktionssystems zu modellieren und ihre Robustheit gegenüber wechselnden Randbedingungen sowie schwankenden Leistungen einzelner Systemelemente zu untersuchen. Insbesondere für den maschinellen Tunnelbau können verschiedene Planungsvarianten für die Baustelleneinrichtung und Systemwahl der TVM schnell und effizient verglichen und beurteilt werden. König et al. [1] sowie Rahm et al. [11] geben eine detaillierte Übersicht über den Aufbau (s. Abbildung 4) und die Anwendung eines Simulationsmodells im maschinellen Tunnelbau.

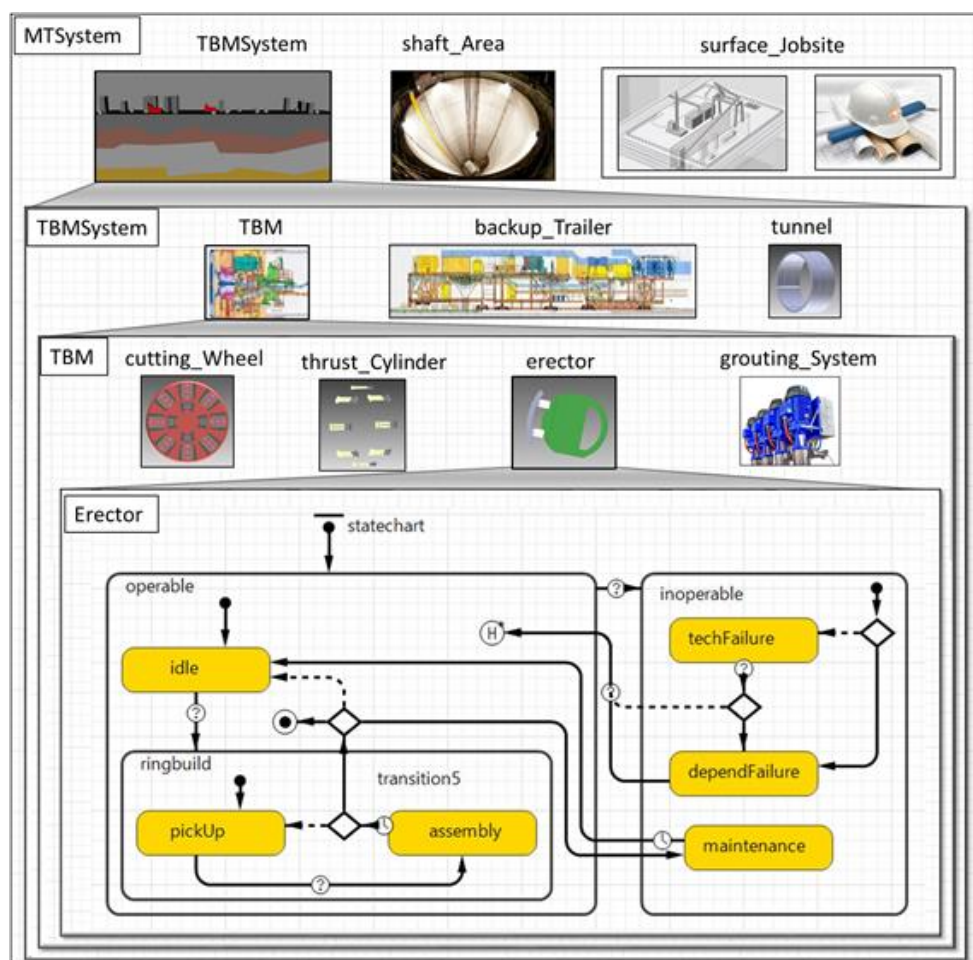


Abbildung 4: Aufbau eines Simulationsmodells eines Tunnelbauprojekts

3.1 Erstellen eines Simulationsmodells

Alle wesentlichen Prozesse und Systemelemente einer Tunnelbaustelle mit TVM-Vortrieb wurden als Grundlage für ein Simulationsmodell formalisiert. Auf diese Weise wurde die Struktur des Gesamtsystems abgebildet und die Abhängigkeiten zwischen Systemelementen identifiziert. Anschließend wurden die Prozesse der einzelnen Elemente über Zustandsdiagramme in das Simulationsmodell implementiert. Die Verknüpfung der Prozesse und deren dynamisches Verhalten basiert auf dem Austausch von Signalen (vgl. Abschnitt 3.2), welche sich aus der formalen Struktur ableiten lassen. Abbildung 5 zeigt ein einfaches Beispiel für die Modellierung der Teilprozesse einer Förderschnecke mit Hilfe eines Zustandsdiagramms. Dieses bildet nicht nur die möglichen Zustände eines Elements ab, sondern beinhaltet insbesondere die Bedingungen, die einen Wechsel des Zustands verursachen können.

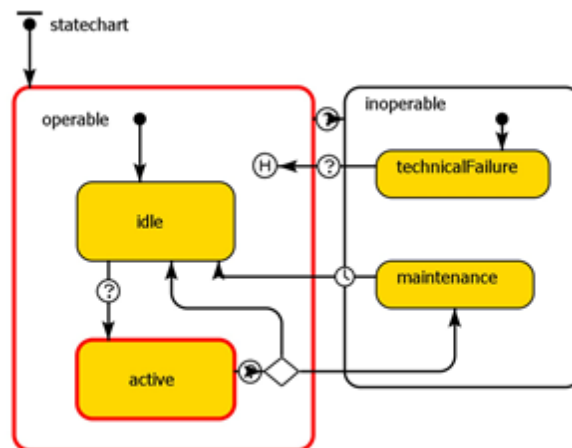


Abbildung 5: Zustandsdiagramm der Förderschnecke im Simulationsmodell

Die Struktur des Simulationsmodells ist hierarchisch und in Abhängigkeit des Detaillierungsgrades untergliedert. Abbildung 6 zeigt das strukturelle Blockdefinitionsdiagramm für die Elemente der unterirdischen Baustelle in der grafischen Modellierungssprache *System Modeling Language* (SysML). Die Elemente werden zunächst dem untertägigen bzw. übertägigen Baustellenbereich sowie dem externen Logistikbereich zugeordnet. Unter Tage befinden sich die TVM und ihr Nachläufer sowie die Logistiksysteme im bereits erstellten Tunnelabschnitt und ggf. im Startschacht. Die TVM (Beispiel Erddruckschild) lässt sich wiederum weiter aufgliedern in: Schneidrad + Antrieb, Förderschnecke, Bandförderanlage, Erektor, Vortriebspressen und Mörtelverpressanlage. Der Detaillierungsgrad der Elemente bzw. die Tiefe der Untergliederung hängt vom zu analysierenden Teilbereich ab. Teilweise ist ein geringerer Detaillierungsgrad ausreichend, um die Leistung eines bestimmten Teilbereichs betrachten zu können.

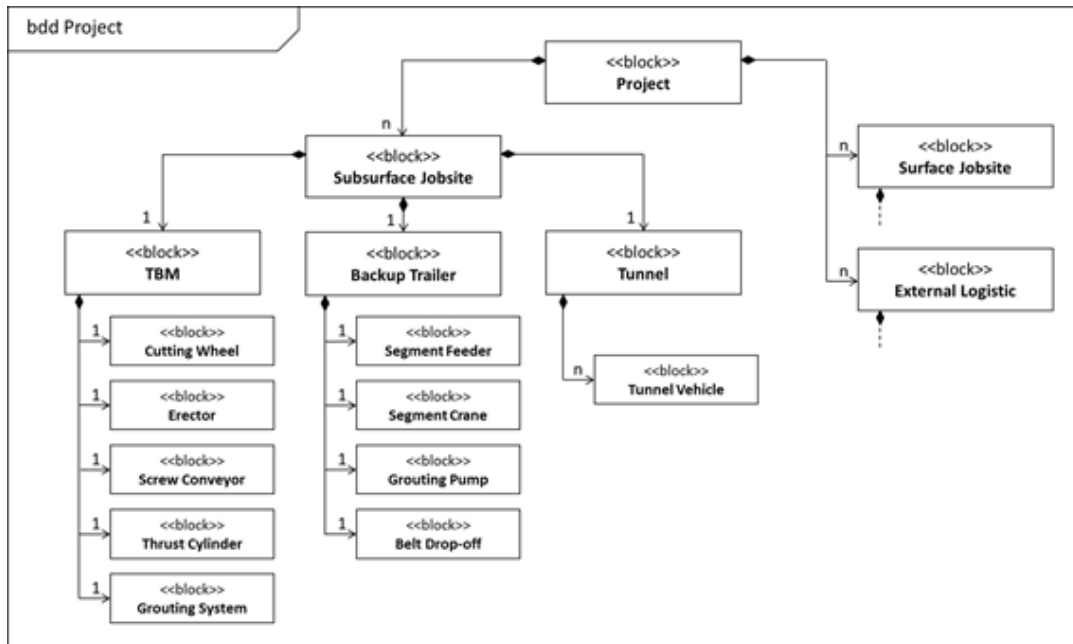


Abbildung 6: SysML Blockdefinitionsdiagramm eines Tunnelbauprojekts

Über Tage befinden sich die Logistikkomponenten für den An- und Abtransport von Bauteilen, Baustoffen, Aushub und Abfällen. Dort befindet sich auch die Verknüpfung zur externen Logistik. Maßgebend sind hier die Lagerkapazitäten sowie die benötigten Hebe- und Transportfahrzeuge. Eine Analyse der Auslastung der Lagerflächen kann zur Planung des Flächenmanagements genutzt werden.

Zusätzlich fördert das Simulationsmodell durch eine Animation der Elemente und der ablaufenden Prozesse das Verständnis des Gesamtsystems. 3D-Visualisierungen (s. Abbildung 7) veranschaulichen räumliche Zusammenhänge, wodurch Planungsfehler vermieden oder leistungsmindernde Elemente im Vorfeld erkannt werden können.

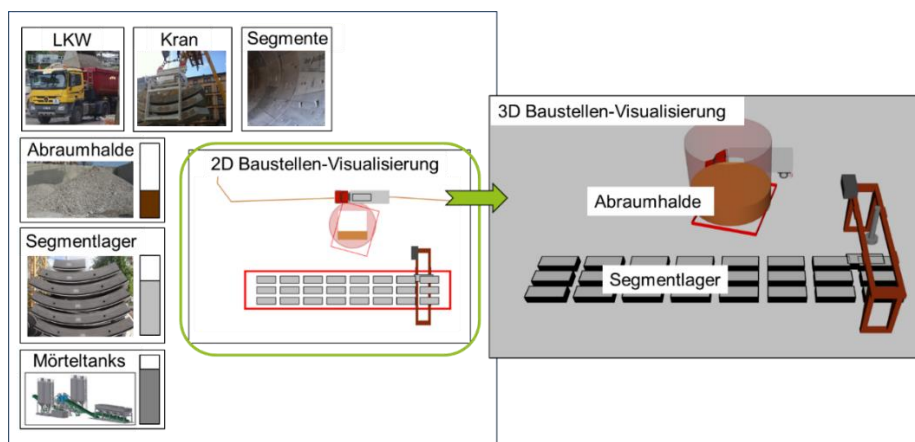


Abbildung 7: Visualisierungsmöglichkeiten des Simulationsmodells

3.2 Wechselwirkungen der Komponenten

Die Interaktion bzw. Kommunikation der Elemente ist über ein Beobachter-Entwurfsmuster implementiert (vgl. [12]). Dazu wird festgelegt, welche Signale das jeweilige Element sendet und empfängt. Das Sequenzdiagramm in Abbildung 8 zeigt, wie auf diese Weise der Ringbau im Simulationsmodell gesteuert wird: Nach Beendigung des Vortriebs sendet die Simulationskomponente „Schneidrad“ das Signal *AdvFin*, welches von der Komponente „Erektor“ empfangen wird. Hat diese ebenfalls das Signal der Komponente „Segmentzuführer“ erhalten, dass ein Tübbing zum Einbau bereit liegt, beginnt die Simulation des Ringbaus. Sobald ein Tübbing vom Erektor aufgenommen wurde, sendet dieser ein Signal und der Segmentzuführer stellt einen weiteren Tübbing bereit. Diese Vorgehensweise lässt sich auch auf andere Elemente bzw. Prozesse übertragen.

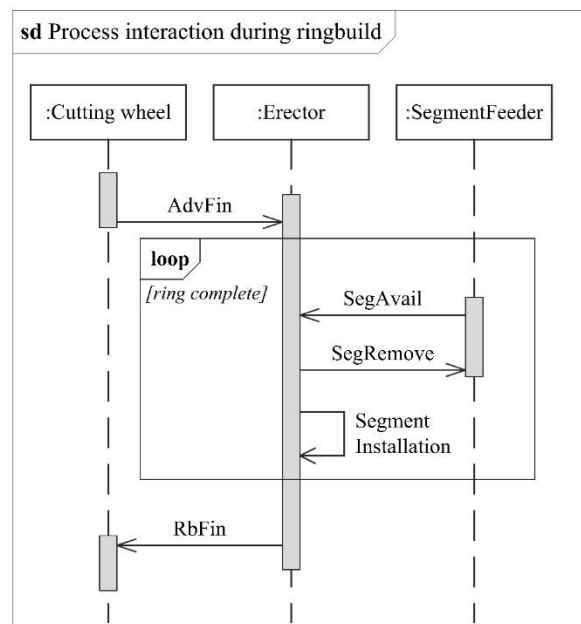


Abbildung 8: SysML Sequenzdiagramm der Interaktion zwischen den Elementen Erektor, Schneidrad und Tübbingzuführer

3.3 Generieren der Eingangsdaten

Viele der Prozesszeiten, die zur Erstellung des Modells benötigt werden, unterliegen stochastischen Einflüssen und können daher nicht zutreffend durch einen konstanten Wert abgebildet werden. Um möglichst realitätsnahe Ergebnisse erzielen zu können, werden die Prozesszeiten mit Hilfe von Verteilungsfunktionen dargestellt. Die Funktionsverläufe werden dabei aus Leistungsdaten bereits abgeschlossener Projekte gewonnen. Abbildung 9 zeigt am Beispiel eines Datensatzes für die Rohrverlängerung die ermittelte Verteilungsfunktion.

Zur Beurteilung der Produktivität eines Projektes sollten daher die bei dem Projekt aufgenommenen Daten als Eingangsgrößen verwendet werden. Die Qualität der Verteilungsfunktion ist dabei stets von der Qualität sowie Quantität der Daten abhängig.

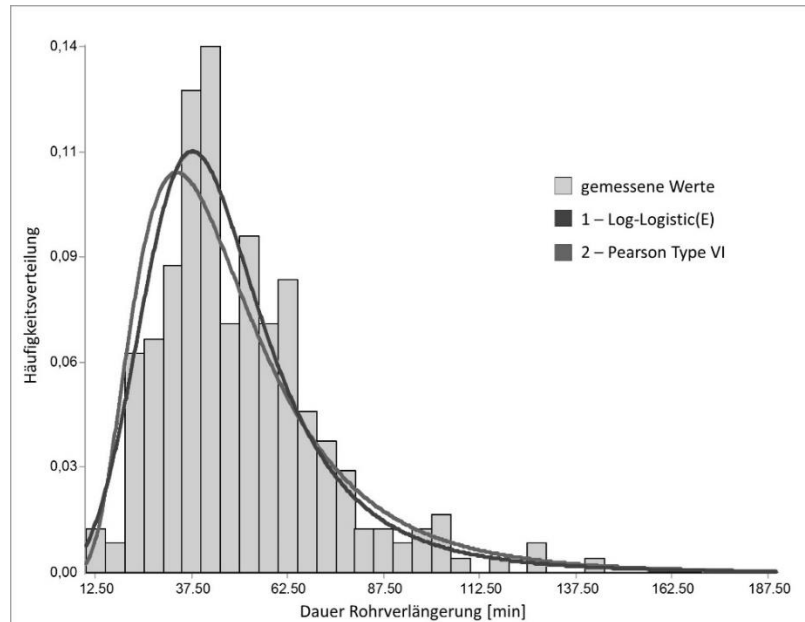


Abbildung 9: Graphischer Vergleich zur Ermittlung der Verteilungsfunktion für die Dauer der Rohrverlängerung

An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass die Schichtingenieure, Poliere und Schildfahrer bei der Gewinnung der erwähnten Daten eine wichtige Schlüsselfunktion haben, derer sie sich leider nicht immer bewusst sind. Die zusätzlich zu den automatisch aufgezeichneten reinen Maschinendaten in Schicht-, Vortriebs- und Ringbauprotokollen sowie in Bautagebüchern aufgezeichneten Informationen sind insbesondere für Stillstände durch Störungen und Wartungsarbeiten, die vielfach bis zu 50% der Vortriebszeit einnehmen, von größter Bedeutung für die Prozessanalyse.

3.4 Simulationsexperimente und Ergebnisse

Im Anschluss wird das Modell durch Monte-Carlo-Studien, bestehend aus 1000 Simulationsläufen, in denen jeweils ein Parametersatz der Eingangswerte aus den Verteilungsfunktionen ausgewählt wird, ausgewertet. Man erhält auf diese Weise Informationen z.B. zur Gesamtverteilung der prognostizierten Projektdauer, und kann vor dem Hintergrund der jeweiligen Risikoaversion eine Gesamtdauer auswählen, welche z.B. in 95 % der Simulationsläufe nicht überschritten wurde. Mit Hilfe von Histogrammen lassen sich die gewählten Werte auch graphisch auswerten (s. Abbildung 10).

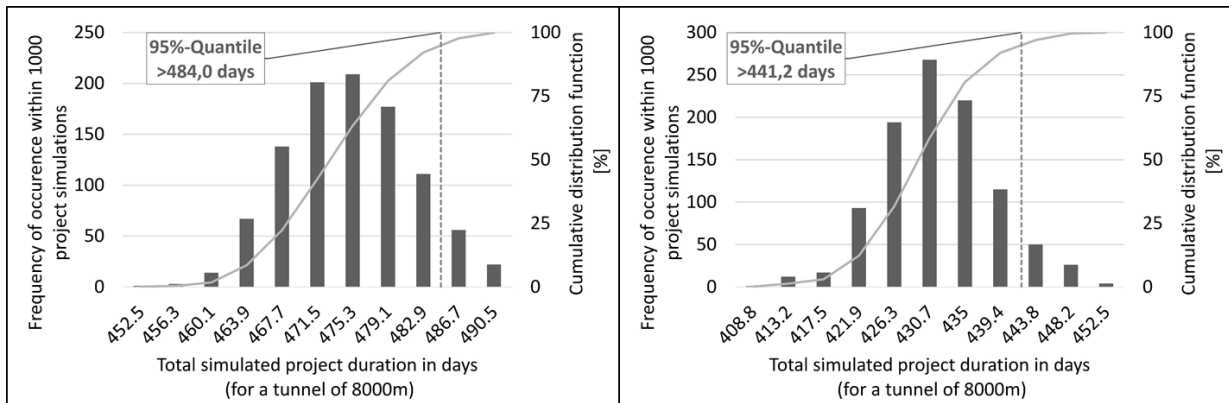


Abbildung 10: Histogramme der Projektdauer eines Variantenvergleichs zweier Logistiksysteme (Vergleichswert hier: 95 % Quantil)

Durch eine Analyse der ungeplanten Stillstandszeiten, die zu Produktionsausfällen führen, lassen sich die leistungsmindernden Elemente identifizieren und die Störungen beheben. Dazu wird die Gesamtprojektdauer in geplante und ungeplante Prozesszeiten unterteilt. Die geplanten Prozesszeiten des Schneidrads sind: Vortrieb, Ringbau und Wartung. Die ungeplanten Stillstandszeiten setzen sich aus den technischen Störungen der Produktionsprozesse und den indirekt verursachten, abhängigen Störungen zusammen. Letztere lassen sich den Elementen zuordnen, welche die Störung verursacht haben. Im Anschluss kann das Element, wenn nötig, ebenfalls auf die eigenen Stillstands-Ursachen untersucht werden.

4 Beispiel

Im Folgenden wird der Einsatz der Prozesssimulation zum Vergleich von zwei Planungsvarianten aufgezeigt. Dazu wurde ein fiktives Beispielprojekt untersucht. Das simulierte Projekt hat eine Tunnellänge von ca. 3050 m sowie einen Ausbruchdurchmesser von 7 m und wird mit einem Hydroschild aufgeföhren.

Nach Maidl [4] ergibt sich die Vortriebsleistung (Ringe pro Tag) aus der Dauer für einen Vortriebszyklus und der täglichen Arbeitszeit. Im maschinellen Tunnelbau wird vielfach im Durchlaufbetrieb (24 h) vorgetrieben. Die Vortriebsdauer pro Ring ergibt sich aus der Länge des Rings und der abgeschätzten Vortriebsgeschwindigkeit. In diesem Beispiel haben die Ringe eine Länge von 1,50 m und es wird eine mittlere Vortriebsgeschwindigkeit von 20 mm/min angenommen. Für den Ringbau wird eine mittlere Dauer von 40 min angesetzt. Zusätzlich wird davon ausgegangen, dass es auf Grund von Störungen im Mittel zu 75 min Stillstand pro Ring kommt. Daraus ergibt sich eine Zykluszeit von 190 min pro Ring und somit eine Vortriebsleistung von 7,6 Ringen pro Tag. Das zu erwartende Aushubvolumen ergibt sich somit zu 438 m³/d.

Der Abtransport des Abraums erfolgt mittels LKWs mit einem Ladevolumen von 20 m^3 . Da im innerstädtischen Bereich aus Lärmschutzgründen nachts kein Abtransport des Abraums gestattet ist, muss der gesamte Abraum eines Tages zwischen 7:00 und 19:00 Uhr abtransportiert werden. Das ergibt eine erforderliche Dauernutzleistung der LKWs von $37 \text{ m}^3/\text{h}$. Bei einer Umlaufzeit der LKWs von 98 min und einer Leistungsminderung von ca. 10 % aufgrund von äußeren Einflüssen und Betriebsbedingungen (s. Girmscheid [13]) erhält man pro LKW eine Dauernutzleistung von $11,02 \text{ m}^3/\text{h}$. Um die erforderliche Leistung zu erreichen, benötigt man daher mindestens 4 LKW. Für die Abraumhalde wird auf der sicheren Seite liegend ein Volumen von 750 m^3 angesetzt.

Das Simulationsmodell verwendet im Gegensatz zur klassischen Leistungsermittlung unscharfe und stochastische Eingangsgrößen für die Vortriebsgeschwindigkeit, die Ringbauzeit und die Umlaufzeit der LKWs. Außerdem werden Störungen der einzelnen Elemente sowie deren Wartung berücksichtigt.

Für die erste Alternative des Variantenvergleichs werden für die Eingangsparameter der zuvor durchgeführten Leistungsermittlung verwendet. Die Abraumhalde hat ein Volumen von 750 m^3 und es werden 6 LKW mit einem Ladevolumen von 20 m^3 gewählt. Für die Umlaufzeit der LKW wird jedoch kein deterministischer Wert, sondern eine Dreiecksverteilung mit einem Mittelwert von 98 min sowie einer maximalen Zeit von 60 min und einer minimalen Zeit von 120 min angenommen, um wechselnde Verkehrsverhältnisse zu berücksichtigen.

In der zweiten Variante wird keine feste Anzahl an LKW vorgegeben. Die Anzahl wird direkt an den Bedarf angepasst. Dazu wird immer, wenn ein LKW beladen wird und die Abraumhalde noch mit mindestens 20 m^3 Abraum gefüllt ist, ein weiterer LKW bestellt. Dieser ist innerhalb von 12 min auf der Baustelle, sodass bei einer Beladedauer von 10 min, die Wagenwechselzeit von 2 min eingehalten wird.

Für beide Varianten wurden mit Hilfe einer Monte-Carlo-Studie des Simulationsmodells die Projektdauer, die Dauer der Stillstände, welche aufgrund einer überfüllten Abraumhalde entstanden sind und die Auslastung der LKWs ermittelt. Abbildung 11 zeigt, wie sich eine Erhöhung der Anzahl der verwendeten LKW auf die Projektdauer auswirkt. Die Projektdauer reduziert sich durch diese Änderung von ca. 291 Tage (Variante 1) auf 260 Tage (Variante 2). Durch die Berücksichtigung der unscharfen und unsicheren Eingangswerte kommt es immer wieder zu einer Überfüllung der Abraumhalde.

Die Reduzierung der Projektdauer in Variante 2 lässt sich auf den angepassten Abtransport des Abraums zurückführen. Die Ergebnisse der Simulation zeigen, dass in allen Simulationsläufen mindestens 7 bis maximal 10 LKW benötigt wurden, um eine störungsarme Abraumlogistik zu ermöglichen.

In Abbildung 12 sind neben der Dauer für Vortrieb und Ringbau die Störfallursachen für die Störung des Schneidrads und deren Dauer der beiden Varianten gegenübergestellt. Die längere Projektdauer der Variante 1 resultiert, bei gleichbleibender Dauer für Vortrieb und Ringbau, direkt aus den Stillständen, die durch die Überfüllung der Abraumhalde entstanden sind.

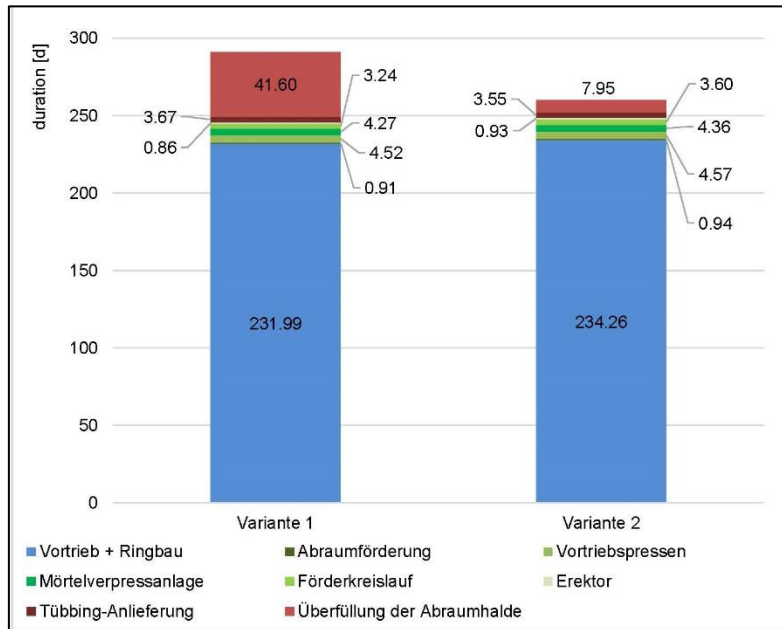


Abbildung 11: Vergleich der Zeiten der Produktion und Stillstände der Varianten 1 und 2 (95% Quantil aus 1000 Simulationen)

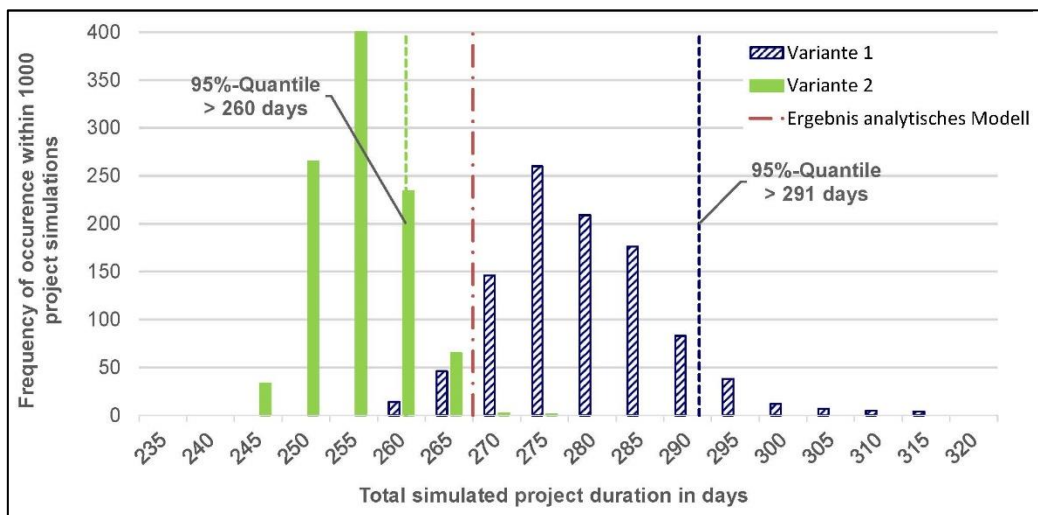


Abbildung 12: Histogramm der Projektdauer bei 1000 Simulationsläufen für Variante 1 und 2 im Vergleich

5 Zusammenfassung

Für die Planung eines maschinellen Tunnelvortriebs sind die Methoden der klassischen Leistungsermittlung aufgrund der dynamischen und unscharfen Randbedingungen nur begrenzt anwendbar und zumeist nicht ausreichend. Werden diese sich ändernden Randbedingungen bereits in der Planung berücksichtigt, können viele Störungen während der Produktion vermieden werden. Es wurde aufgezeigt, dass Prozesssimulation eine geeignete Methode ist, um die komplexen Wechselwirkungen im maschinellen Tunnelbau abzubilden und zu analysieren. Unter Berücksichtigung stochastischer und unscharfer Eingangsparameter können die benötigten Ressourcen ermittelt und hinsichtlich ihrer Robustheit gegenüber Schwankungen untersucht werden. Dadurch können nicht nur Planungsvarianten verglichen, sondern auch einzelne Komponenten hinsichtlich ihrer Produktivität beurteilt werden.

Danksagung

Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die Förderung dieser Arbeit an der Ruhr-Universität Bochum im Rahmen der Teilprojekte C3 und D1 des Sonderforschungsbereichs SFB 837 „Interaktionsmodelle für den maschinellen Tunnelbau“.

Literatur

- [1] König, M.; Thewes, M.; Rahm, T.; Scheffer, M.; Sadri, K.; Conrads, A.: *Prozesssimulation von maschinellen Tunnelvortrieben – Verfügbarkeitsanalysen der Leistungsprozesse unter Berücksichtigung von Stillständen*. In: Bauingenieur 89 (11), 2014, S. 467-477
- [2] Thewes, M.; König, M.; Conrads, A.; Scheffer, M.: *Prozesssimulation zur Planung und Leistungsanalyse maschineller Tunnelvortriebe: Wechselwirkungen der Komponenten, Vergleich der Planungsvarianten, Beurteilung der Produktivität*. In: Forschung + Praxis 46, Vorträge der STUVA-Tagung 2015, Dortmund, S. 98-103, Ernst & Sohn Verlag, Berlin
- [3] Conrads, A.; Thewes, M.; Scheffer, M.; König, M.: *Prozesssimulation für die Leistungsermittlung und -planung beim maschinellen Tunnelbau*. In: Taschenbuch für den Tunnelbau 2017, S. 166-198, Ernst & Sohn Verlag, Berlin
- [4] Maidl, U.; Wingmann, J.: *Leistungsprognose von Erddruckschilden im Lockergestein*. In: Geomechanics and Tunnelling 2(2009), Nr. 2, S. 189-197
- [5] Leitner, W.: *Baubetriebliche Modellierung der Prozesse Maschineller Tunnelvortriebe im Festgestein – Von der Penetration zur Vortriebsgeschwindigkeit*. Dissertation 2004, Leopold-Franzens-Universität Innsbruck, Bau fakultät – Architektur und Bauingenieurwesen
- [6] Duhme, R.; Rahm, T.; Thewes, M.; Scheffer, M.: *A Review of Planning Methods for Logistics in TBM Tunneling*. In: Proceedings of ITA WTC 2015 Congress and 41st General Assembly, May 22-28, 2015 Dubrovnik

- [7] Hofstadler, C.: *Bauablaufplanung und Logistik im Baubetrieb*, S. 41- 48. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2007
- [8] Babendererde, T.; Elsner, P.; Hahn, C.: *Techniken zur Befreiung blockierter Vortriebsmaschinen aus der Abbaukammer heraus: Erfahrungen mit dem Einsatz von Kunstböden und sprühbaren Membranen*. In: *Forschung + Praxis* 46, Vorträge der STUVA-Tagung 2015, Dortmund, S. 79-83, Ernst & Sohn Verlag, Berlin
- [9] BGBl. I S. 1909: Druckluftverordnung vom 4. Oktober 1972 (BGBl. I S.1909), die zuletzt durch Artikel 6 der Verordnung vom 18. Dezember 2008 (BGBl. I S. 2768) geändert worden ist.
- [10] Holzhäuser, J. ; Mayer, C.; Hunt, S.: *Erfahrungen bei Tunnelvortrieben im Lockergestein und im Fels bei sehr hohem Grundwasserdruck*. In: *Vorträge zum 14. Darmstädter Geotechnik-Kolloquium am 15. März 2007*, Mitteilungen des Institutes und der Versuchsanstalt für Geotechnik der Technischen Universität Darmstadt, S. 3-19.
- [11] Rahm, T.; Scheffer, M.; Thewes, M.; König, M.; Duhme, R.: *Evaluation of Disturbances in Mechanized Tunneling Using Process Simulation*. In: *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering* 31 (3), 2016, S. 176–192. DOI: 10.1111/mice.12143.
- [12] Gamma, E., Helm, R., Johnson, R., & Vlissides, J.: *Design patterns – elements of reusable object-oriented software*. Addison-Wesley, (2014), Reading, MA.
- [13] Girmscheid, G.: *Leistungsermittlungshandbuch für Baumaschinen und Bauprozesse*. Springer Verlag, Zürich, 2010, 4. Auflage