

# BIM-Anwendungen im Tunnelbau

## Digitale Planung und Ausführung von Tunnelbauprojekten

Die Anwendung von Building Information Modeling (BIM) im Infrastrukturbau soll bis zum Jahr 2020 in Deutschland eingeführt und anschließend etabliert werden. Dies schließt auch die Planung, die Herstellung und den Betrieb von Tunnelbauwerken ein. Im Rahmen von Forschungs- und Praxisprojekten wurden in den letzten Jahren bereits Erfahrungen zur Verwendung der BIM-Methodik gesammelt. Es hat sich gezeigt, dass die ganzheitliche Einführung von BIM eine genaue Analyse der einzelnen Prozesse und eine projektspezifische Definition von sinnvollen Anwendungsfällen erfordert. Im Rahmen des Beitrags werden aktuelle Erfahrungen und einzelne BIM-Anwendungsfälle im Tunnelbau erläutert. Es wird exemplarisch gezeigt, wie die geometrische und semantische Informationstiefe anwendungsfallorientiert festgelegt werden kann. Anschließend wird auf die Umsetzung einer gemeinsamen Datenumgebung sowie die Verknüpfung und den Austausch von Fachmodellen eingegangen. Hierbei haben sich insbesondere Ansätze auf Basis von Linked Data bzw. Multimodell-Containern als besonders geeignet herausgestellt. Anhand von praxisnahen Beispielen werden verschiedene Anwendungsfälle und damit verbundene Ziele für den Einsatz von BIM präsentiert.

**Keywords** Building Information Modeling; Tunnelbau; Bauwerksmodelle; Informationssystem

### Building Information Modeling in tunneling – digital design and construction of tunneling projects

The application of Building Information Modeling (BIM) in the field of infrastructure engineering is to be introduced and subsequently established in Germany by 2020. This includes the planning, production and operation of tunnel structures. In research and real projects, experiences concerning the application of the BIM methodology were collected over the last couple of years. As it turned out, the holistic introduction of BIM requires a detailed analysis of processes and project specific definition of reasonable use cases.

Within the scope of this paper, current experiences and BIM use cases in the field of tunneling are discussed. The definition of a reasonable geometric and semantical level of detail for the specific use cases is exemplified. Following that, the implementation of a shared data interface, as well as the correlation and exchange of subject-specific models are described. Hereby, approaches based on linked data or multi model containers have proven to be especially suitable. Based on practical examples, several use cases and the associated project goals for the application of BIM are discussed.

**Keywords** building information modeling; tunneling; digital structure models; information system

## 1 Einleitung

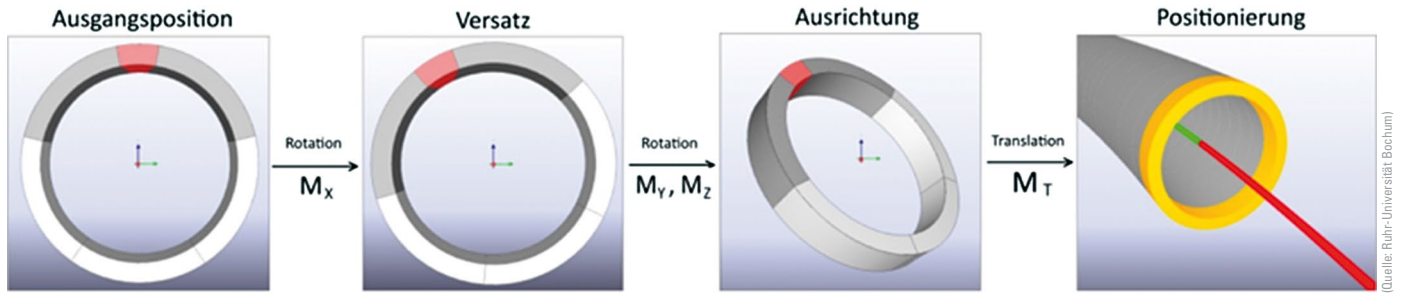
Die digitale Abwicklung von Bauprojekten ist nach Erkenntnis der Reformkommission „Bau von Großprojekten“ des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) eine Maßnahme, um Großprojekte in Zukunft erfolgreicher zu gestalten. Hierbei wird das Ziel verfolgt: „Erst virtuell, dann real bauen.“ Die Nutzung digitaler Methoden des Building Information Modeling (BIM) ist dabei ein wesentlicher Bestandteil. Diese werden dem Stufenplan „Digitales Planen und Bauen“ des BMVI zufolge auch für Tunnelbauprojekte der öffentlichen Hand verpflichtend vorgeschrieben [1]. BIM wird im Tunnelbau bisher nur in wenigen Bereichen eingesetzt. Hierzu gehört im Wesentlichen die dreidimensionale Modellierung des Tunnelrohbaus im maschinellen Vortrieb. Der Tunnelbau ist ein interdisziplinäres Feld des konstruktiven Ingenieurbaus und stellt verschiedene und teilweise konträre Anforderungen an digitale Modelle. Im Rahmen der Planung sind Informationen zum Gelände, zur Bebauung, zu den Bodenschichten und zur geplanten Trassierung in Bezug auf das geplante Bauwerk erforderlich. Während der Aus-

führung müssen logistische Aspekte zur Ver- und Entsorgung der Baustelle besonders beachtet werden, da es sich hierbei im Gegensatz zum klassischen Hochbau um eine nicht stationäre Baustelle handelt. Ferner sind im Tunnelbau vortriebsbegleitende Setzungen möglich, die Interaktionen mit den angrenzenden Bauwerken hervorrufen können. Somit ergibt sich neben einer zeitlichen auch eine örtliche Komponente, welche in den digitalen Modellen abgebildet werden muss. Des Weiteren sind umfangreiche Monitoringdaten und speziell im maschinellen Vortrieb auch Maschinendaten kontinuierlich zu integrieren und zu bewerten. Diese Aspekte stellen eine große Herausforderung an das Management der digitalen Informationen dar.

## 2 Bauwerksmodelle im Tunnelbau

### 2.1 Prozesse und Informationsanforderungen

Die Einführung von BIM erfordert eine detaillierte Analyse der bestehenden Aufgaben und Prozesse. Digitale Methoden können nur dann erfolgreich umgesetzt werden,



**Bild 1** Parametrische Erzeugung eines Tunnelbauwerks mit einzelnen Tübbingungen anhand einer Trassierung  
Parametric design of a segmented lining along a tunnel axis

wenn diese in die Planungs- und Ausführungsprozesse sinnvoll integriert bzw. die bestehenden Prozesse entsprechend angepasst werden. Aufbauend auf der detaillierten Analyse der wichtigsten Planungs- und Ausführungsprozesse werden für die einzelnen Aufgaben die notwendigen Informationen, Verantwortlichkeiten und Rollen definiert. Anschließend erfolgt eine Zusammenführung der einzelnen Informationsanforderungen, um auf dieser Basis die notwendige Informationstiefe für verschiedene digitale Modelle ableiten zu können.

Im Tunnelbau haben sich auf Basis dieser Analysen verschiedene Informationsmodelle herauskristallisiert. Hierzu gehören Modelle zur Beschreibung der Trassierung, des Geländes, inklusive Aspekten des Umweltschutzes, der Bodenschichten, der oberirdischen Bebauung, der im Boden befindlichen Bauwerke, des zu errichtenden Tunnelbauwerks und der eigentlichen Baustelle, inklusive der notwendigen Maschinen und logistischen Flächen. Die verschiedenen Prozesse benötigen je nach Leistungsphase unterschiedliche geometrische und semantische bzw. alphanumerische Informationen, die im Einzelnen projektspezifisch festgelegt werden müssen. Bei der Definition der Informationstiefe (Level of Detail/Information) für bestimmte Phasen und Anwendungen sollte immer beachtet werden, dass nur so viel wie tatsächlich notwendig modelliert wird. Eine zu detaillierte Modellierung kann dazu führen, dass die Modelle nicht mehr in einer angemessenen Zeit verarbeitet werden können.

## 2.2 Parametrische Modellierung

Bei der Anwendung von BIM im Tunnelbau hat die parametrische Modellierung eine besondere Bedeutung. Hierbei wird die Geometrie anhand von Parametern bzw. unter Berücksichtigung von Querschnitten automatisch generiert. Im Rahmen der Vorplanung kann zum Beispiel das Tunnelbauwerk mit seinen verschiedenen räumlichen Abschnitten auf Basis der Trassierung modelliert werden (Bild 1). Für die parametrische Modellierung stehen heutzutage viele Werkzeuge zur Verfügung. Ein wesentlicher Vorteil dieser Vorgehensweise ist, dass bei der Änderung der Trassierung das entsprechende Tunnelbauwerk automatisch angepasst wird. Die Anpassung sollte jedoch immer bzgl. der fachlichen Korrektheit geprüft werden.

Insbesondere während der Untersuchung von verschiedenen Varianten, sowohl für den Verlauf der Trassierung als auch für das Design des Tunnelbauwerks selbst, können parametrische Modelle sinnvoll angewendet werden.

## 2.3 Verknüpfung von Modellen und Informationen

Die für die einzelnen Aufgaben benötigten Informationen stammen häufig aus verschiedenen Datenquellen und somit Datenmodellen. Damit die Informationen auch genutzt werden können, sind diese in vielen Fällen zuvor zu verknüpfen. Die einzelnen Modellelemente werden bzgl. ihrer Position und Abmessung in einem Koordinationsmodell zusammengeführt. Hierzu müssen gemeinsame Maßstäbe und Koordinatensysteme festgelegt werden. Dies erfolgt in der Regel über die Definition von entsprechenden Referenzpunkten. Bei sehr großen Bauwerken, die eine Ausdehnung von mehreren km besitzen, muss gegebenenfalls auch die Erdkrümmung berücksichtigt werden. Zur Vermeidung von Abweichungen wird häufig in Abschnitten gearbeitet, die sich auf ein kartesisches Koordinatensystem beziehen. Neben der geometrischen Zusammenführung müssen für bestimmte Anwendungen auch Informationen verschiedener Modelle verknüpft werden. Hierzu ist es zwingend erforderlich, dass die einzelnen Modellelemente über eine Kennung eindeutig identifiziert werden können und dass die Projektstruktur in allen Teilmodellen identisch ist. Die Verknüpfung ist eine Speicherung der einzelnen Kennungen (Identifikatoren) der betrachteten Informationen. Zum Austausch der verknüpften Informationen haben sich in den letzten Jahren Linked-Data-Modelle oder Multimodelle etabliert [2]. Multimodelle kombinieren verschiedene Fachmodelle. Die Verknüpfungen werden dabei als externe Informationen abgelegt. Fachmodelle, Verknüpfungen und zusätzliche Informationen werden zusammenhängend in einem Container bzw. Ordner gespeichert und ausgetauscht. Im maschinellen Tunnelvortrieb ist zudem die Verknüpfung der Monitoringdaten und Maschinendaten mit einzelnen Vortriebsschritten von großer Bedeutung. Hierzu wurden in den letzten Jahren entsprechende Informationssysteme aufgebaut, die eine Visualisierung und Auswertung dieser Informationen auch für die Untersuchung von aufgetretenen Schäden ermöglichen [3, 4].

### 3 Anwendungsfälle

Aufgrund der vielfältigen Projektanforderungen und der unterschiedlichen Randbedingungen handelt es sich bei Ingenieurbauten im Allgemeinen um Unikate. Dies gilt insbesondere für Tunnelbauwerke mit ihren Wechselwirkungen zwischen Bauwerk, Bauprozess und Baugrund sowie ihrem in der Regel großen Projektumfang. Konsequenterweise muss auch die BIM-Arbeitsmethodik jeweils auf die Projektanforderungen zugeschnitten werden. Diese projektspezifische Anpassung erfolgt auch über die Auswahl und Ausgestaltung der BIM-Anwendungsfälle. Die Anwendungsfälle werden aus den (BIM-) Projektzielen abgeleitet. Allgemeingültige Projektziele beziehen sich auf Kostenminimierung, Qualitätsmaximierung, Termintreue und Umweltverträglichkeit. Zudem werden ein minimaler Einfluss auf bestehende Infrastrukturen, die Einbindung der Öffentlichkeit sowie natürlich der minimale Einfluss auf das Schutzgut Mensch angestrebt. So ist im Tunnelbau das Finden einer optimalen Trasse ein disziplinspezifischer Konsens der unterschiedlichen Zielsetzungen. Neben geometrischen Zwangspunkten, wie bspw. der fixen Lage von Stationsbauwerken, sind Einflussgrößen wie unterirdische Bestandsbauwerke, Gründungen, ungünstige geologische Formationen, sensible oder historische Bauwerke etc. zu beachten. Ein weiterer Zielkonsens aus dem Tunnelbau ist das Management von Setzungen als residuales Risiko des Vortriebs. Insbesondere im innerstädtischen Bereich muss der Einsatz geeigneter Gegenmaßnahmen sinnvoll abgeschätzt werden. Damit diese Projektziele durch entsprechende BIM-Anwendungsfälle unterstützt werden können, ist eine Verlagerung des Aufwands zur Informationserzeugung in frühe Leistungsphasen der Planung häufig notwendig. Aufbauend auf diesen Zielen werden BIM-Anwendungsfälle für das konkrete Projekt abgeleitet. Nachfolgend werden Beispiele aufgezeigt, wobei ein konkreter Bezug zum Tunnelbau besteht bzw. beispielhaft hergestellt wird. Auf eine Auflistung von allgemeingültigen BIM-Anwendungsfällen (bspw. Planungskoordination, 2-D-Planableitung oder 4-D-/5-D-Modellierung etc.) wird an dieser Stelle verzichtet und auf weiterführende Literatur verwiesen [5, 6].

#### Übergreifende BIM-Anwendungsfälle

- Verknüpfung von Dokumenten, Bauteilen bzw. übergeordneten Abschnitten, geologischer Aufnahme und Geodaten (bspw. Verknüpfung von Fotos mit dem Bestandsmodell oder Ortsbrustaufnahmen mit Ausbruchabschnitten im Baugrundmodell oder Wartungsprotokollen bzw. der Bewertung von Schädigungsverläufen im As-built-Modell)

#### BIM-Anwendungsfälle in der Planungsphase

- (teilautomatisierte) parametrische Trassenfindung mit Vorgabe von Grenzradien und Grenzgefällen sowie geometrischen Zwangspunkten
- Ableitungen von Visualisierungen zur Unterstützung der Öffentlichkeitsarbeit im Planfeststellungsverfahren

- Einordnung der Baumaßnahme in die bestehende Bebauung (bspw. Start-/Endschacht-Situation in innerstädtischen Bereichen)

#### BIM-Anwendungsfälle in der Bauvorbereitung bzw. in der Bauphase

- Tracking der Bauteile (bspw. Tübbingsteine) von der Produktion über Transportlogistik und Einbau bis in den Betrieb (Lebenszyklus-Management) [4]
- Aufnahme von Beschädigungen und Mängeln in der Ausführung (bspw. der Tübbingsteine) zur Qualitätssicherung im erweiterten Lebenszyklus-Management [4]
- Modellbasiertes Reporting, bspw. in Form von Leistungsstandmeldungen (Vortriebsleistung pro Schicht bzw. Tag) oder anderen aggregierten Daten
- 3-D-Modell der anstehenden Geologie (inkl. Abgleich der prognostizierten und angetroffenen Geologie)
- Soll-Ist-Vergleich von Ausbruchabschnitten im bergmännischen Vortrieb, ggf. inklusive Übernahme der tatsächlichen Ausbruchskubatur in das 3-D-Modell durch Laserscanning
- Modellbasierter Soll-Ist-Vergleich der Trasse während der Ausführung durch Integration der Vermessungsdaten in das 3-D-Modell
- Datenbankgestützte Aufnahme der (Maschinen-)Sensorik und ggf. Integration von Vermessung der Oberfläche, des Tunnelvortriebs sowie weiterer Monitoringdaten
- Numerische Simulation des Vortriebs bzw. des Ausbruchs mit Rückkopplung zu den Monitoringdaten (z. B. zur Prognose von zu erwartenden Setzungen durch kalibrierte numerische Modelle) zur Bewertung von sensiblen Gebäuden bzw. Gebieten [7]
- Alarmierung bei Überschreitung von Grenzwerten (bspw. Setzungen, Ringspaltverpressdruck, Überaushub etc.), die durch Sensorik überwacht werden [4]
- Auswertung, Dokumentation und Visualisierung der tatsächlich aufgetretenen Setzungsmulde
- Aktualisierung der Projektplanung durch baubegleitende Simulation der Produktions- und Logistikprozesse ggf. unter dem Einfluss auftretender Prozessstörungen [8]
- Anpassung/Steuerung der Baustellen-Logistik durch baubegleitende Datenerhebung und entsprechende Prozesssimulation [9]

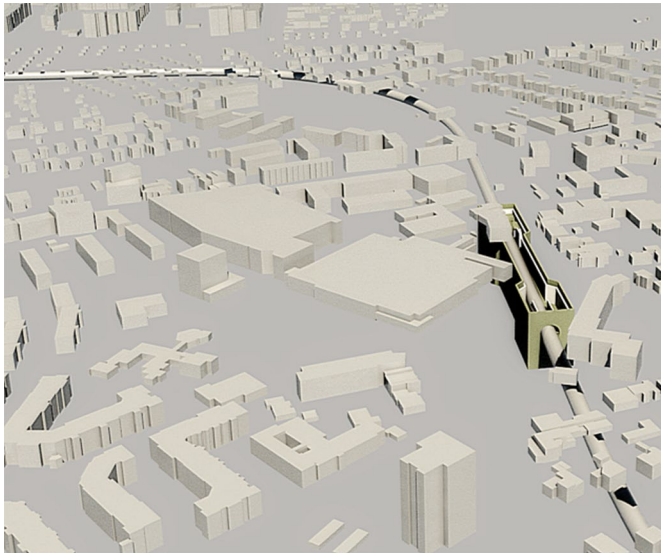
#### BIM-Anwendungsfälle im Betrieb

- Lebensdauermanagement durch frühzeitiges Erkennen des Instandsetzungsbedarfs

Im Folgenden werden beispielhaft drei BIM-Anwendungsfälle für den Tunnelbau im Detail dargestellt.

### 3.1 Darstellung der Baumaßnahme im Kontext der oberirdischen Bebauung

Eine grundlegende Planungsleistung ist, ein Bauwerk so zu planen, dass es sich möglichst gut in eine Bestandssituation einfügt. Dies erfolgt in der Regel durch Darstellun-



**Bild 2** Darstellung einer unterirdischen Haltestelle und Tunnelröhre im Kontext der oberirdischen Bebauung  
Visualization of an underground station and of a tunnel in the context of the surrounding construction

gen in Draufsichten, Seitenansichten und Schnitten. Allerdings fällt Beteiligten, die nur selten Umgang mit Bauzeichnungen haben, die Ableitung der dreidimensionalen Situation aus zweidimensionalen Plandarstellungen erfahrungsgemäß wesentlich schwerer. Dieser Umstand erschwert insbesondere die Öffentlichkeitsbeteiligung bzw. die Abstimmung mit Entscheidungsträgern. Wichtige Impulse für die Planung werden damit a priori durch die Wahl der Methodik ausgeschlossen. Unzweifelhaft ist das Erkennen von Kollisionen und kritischen Situationen aber auch für den erfahrenen Ingenieur am 3-D-Modell einfacher als auf 2-D-Planzeichnungen mit einer begrenzten Anzahl von Schnitten.

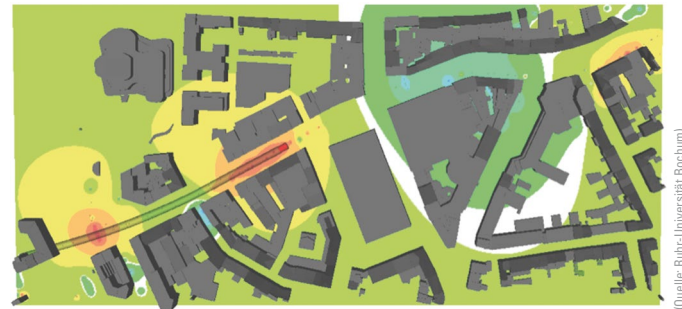
Die planerische Aufgabe der Einordnung einer Baumaßnahme in die Bestandssituation kann folglich durch die BIM-Arbeitsmethodik unterstützt werden. Dies kann beispielsweise durch die Kombination des 3-D-Bauwerksmodells, Geländemodells (DGM) und 3-D-Stadtmodells erfolgen (Bild 2). Eine Verknüpfung mit Hausakten, Fotos, Protokollen, Informationen zu Ansprechpartnern oder ähnlichen Dokumenten ist mit den einfachen 3-D-Stadtmodellen problemlos möglich. Ein derartiges 3-D-Modell ermöglicht den Bürgern, die Maßnahme besser zu verstehen und die Vor- und Nachteile von Planungsalternativen besser einzuschätzen.

### 3.2 Bauteil-Tracking zum Lebenszyklus-Management eines Bauwerks

Ein weiterer Anwendungsfall ist die Nachverfolgung von Bauteilen von der Produktion über die Logistik bis zum Einbau. Neben der Erfassung von Ort, Zeit und Status (Tracking) können den Bauteilen schrittweise weitere Informationen angehängt werden, z. B. Liefer- und Freigabeprotokolle. Durch das Tracking werden



**Bild 3** Tracking der Bauteile während der Bauausführung inkl. Schadensdokumentation im Sinne des Lebenszyklus-Managements  
Component tracking during tunnel construction including documentation of damages for life-cycle-management



**Bild 4** Visualisierung von vortriebsbedingten Setzungen  
Visualization of the settlements caused by tunnel advance

Daten erfasst, die in der Logistikplanung zum Tragen kommen können. Das Bauteil-Tracking erfolgt üblicherweise per Bar-Code oder QR-Code-Scanning, aber auch eine Identifikation über RFID (radio-frequency identification) ist möglich. Jedes Bauteil hat einen eindeutigen Status (bspw. produziert, zur Baustelle transportiert, eingebaut, beschädigt etc.). Durch mobile Endgeräte kann der Status eines Bauteils ausgelesen und ggf. verändert werden (Bild 3).

So können auch Beschädigungen vor Ort aufgenommen und direkt zugeordnet werden. Eine Verknüpfung von Fotos oder Anmerkungen ist ebenfalls denkbar [4].

### 3.3 Überwachung und Visualisierung von Oberflächen-Vermessungsdaten

Beim Tunnelvortrieb im innerstädtischen Bereich stellt die Schädigung der Oberflächenbebauung durch Setzungen eines der residualen Risiken der Baumaßnahme dar. Während die Setzungen in der Planungsphase über Prognosemodelle abgeschätzt werden, können diese während der Bauausführung über Messungen kontrolliert werden. Insbesondere zur aktiven Steuerung der Vortriebsauswirkungen müssen die Messungen in Quasi-Echtzeit an das ausführende Personal übermittelt werden, sodass eine gezielte Anwendung von Maßnahmen mit dem Ziel der Setzungsminimierung erfolgen kann. Die Ergebnisse können mit den BIM-Modellen in aggregierter Form verknüpft werden. Damit ergeben sich vielfältige Darstellungs- und Auswertungsmöglichkeiten (Bild 4).

## 4 Zusammenfassung und Ausblick

Der Einsatz von Building Information Modeling besitzt auch für den Tunnelbau ein großes Potenzial und kann heutzutage auch schon in gewissem Umfang in der Praxis angewendet werden. Insbesondere die Visualisierung von komplexen Zusammenhängen, um mögliche Risiken besser abwägen und Entscheidungen besser treffen zu können, bietet neue Möglichkeiten. Das Potenzial wird jedoch noch nicht in vollem Umfang genutzt. Hierzu sind insbesondere Entwicklungen im Bereich der Standardisierung und die Sammlung von weiteren Erfahrungen in der Anwendung von BIM im Tunnelbau notwendig. Im Bereich des ganzheitlichen Datenmanagements ist die weitere Entwicklung von innovativen Lösungen auf Basis von Linked-Data- bzw. Multimodell-Ansätzen notwendig.

### Literatur

- [1] BMVI (Hrsg.): *Stufenplan Digitales Planen und Bauen – Einführung moderner, IT-gestützter Prozesse und Technologien bei Planung, Bau und Betrieb von Bauwerken*. <https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Publikationen/DG/stufenplan-digitales-bauen.pdf>, Zugriff 04.01.2017.
- [2] DEMHARTER, J.; FUCHS, S.; SCHAPKE, S.-E.; SCHERER, R. J.: *Multimodell und Multimodellcontainer*. Informationssysteme im Bauwesen 1, VDI-Buch, Springer Vieweg, 2014, S. 39–63.
- [3] SCHINDLER, S.; HEGEMANN, F.; KOCH, C.; KÖNIG, M.; MARK, P.: *Radar interferometry based settlement monitoring in tunnelling: Visualisation and accuracy analyses*. Visualization in Engineering 4 (2016), No. 1, pp. 1–16.
- [4] EDELHOFF, D.; NAGEL, F.; HANDKE, D.; MEYER, J.: *Online-Überwachung maschineller Vortriebe*. Tunnel 6 (2015), S. 12–21.
- [5] BORMANN, A.; KÖNIG, M.; KOCH, C.; BEETZ, J.: *Building Information Modeling – Technologische Grundlagen und industrielle Praxis*. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2015.
- [6] HAUSKNECHT, K.; LIEBICH, T.: *BIM Kompendium – Building Information Modeling als neue Planungsmethode*. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2016.
- [7] NAGEL, F.; SPOHR, I.; SPEIER, L.: *Beobachtungsmethode in der Geotechnik – Verknüpfung von Messung und Simulation*. Tunnel 3 (2012), S. 40–47.
- [8] RAHM, T.; DUHME, J. R.; SCHEFFER, M.; THEWES, M.; KÖNIG, M.: *Evaluation of Disturbances in Mechanized Tunneling Using Process Simulation*. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering 31 (2016), No. 3, pp. 176–192.
- [9] 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), No. 5.

nen, bietet neue Möglichkeiten. Das Potenzial wird jedoch noch nicht in vollem Umfang genutzt. Hierzu sind insbesondere Entwicklungen im Bereich der Standardisierung und die Sammlung von weiteren Erfahrungen in der Anwendung von BIM im Tunnelbau notwendig. Im Bereich des ganzheitlichen Datenmanagements ist die weitere Entwicklung von innovativen Lösungen auf Basis von Linked-Data- bzw. Multimodell-Ansätzen notwendig.

### Autoren

Prof. Dr.-Ing. Markus König  
Ruhr-Universität Bochum  
Lehrstuhl für Informatik im Bauwesen  
Universitätsstraße 150  
44780 Bochum  
koenig@inf.bi.rub.de

Tobias Rahm, M.Sc.  
ZPP Ingenieure AG  
Lise-Meitner-Allee 11  
44801 Bochum  
tr@zpp.de

Dr.-Ing. Felix Nagel  
ZPP Ingenieure AG  
Ackerstraße 3b  
10115 Berlin  
na@zpp.de

Prof. Dr.-Ing. Ludger Speier  
ZPP Ingenieure AG  
Lise-Meitner-Allee 11  
44801 Bochum  
ls@zpp.de