

Einsatzmöglichkeiten von Building Information Modelling in der Planungs- und Bauphase im maschinellen Schildvortrieb

Der Beitrag lotet die Einsatzmöglichkeiten ganzheitlicher Bauwerksmodelle im maschinellen Schildvortrieb aus. Building Information Modelling (BIM), welches im Hochbau bereits fest etabliert ist, kann auch im Tunnelbau als wertvolles Werkzeug verwendet werden. Dies trifft nicht nur auf den Betrieb des fertigen Tunnels, sondern auch auf die Planungs- und Bauphase zu. Ein integratives Datenmanagement, welches semantische Informationen direkt mit einer dreidimensionalen Geometriedarstellung verknüpft, bietet die Möglichkeit, sämtliche für die Planung und den Vortrieb relevanten räumlich-zeitlichen Informationen in einer einheitlichen Datenstruktur zu erfassen und damit allen Projektbeteiligten zugänglich zu machen.

Anhand beispielhafter Umsetzungen von Softwaremodulen, die miteinander kommunizieren und auf einer gemeinsamen Datenbasis arbeiten, werden Anwendungsszenarien vorgestellt, in denen BIM seinen Mehrwert bei konkreten Fragestellungen unter Beweis stellen kann. Die Szenarien decken Aufgaben verschiedener Projektphasen ab, wie z.B. Setzungsberechnungen in der Entwurfsphase, statische Berechnungen bei der Ausführungsplanung, Prozessdatenerfassung während des Vortriebs und die Analyse von Vortriebsdaten im Nachgang.

Keywords: BIM, Prozesscontrolling, numerische Simulation, maschineller Schildvortrieb

Applications of Building Information Modelling in the design and construction phase of mechanized shield tunnelling projects: The article explores the possible applications of holistic building models in mechanised shield tunnelling. Building Information Modelling (BIM), which is already firmly established in building construction, can also be used as a valuable tool in tunnel construction. This applies not only to the operation of the finished tunnel, but also to the planning and construction phase. An integrative data management, which directly links semantic information with a three-dimensional geometry representation, offers the possibility to acquire all relevant spatiotemporal information for planning and construction in a uniform data structure and, thus, to make it accessible to all project participants.

Based on exemplary implementations of software modules that communicate with each other and interact on a common database, application scenarios are presented in which BIM can

demonstrate its added value in specific questions. The scenarios cover tasks of various project phases, e.g. settlement prognoses in the design phase, static analyses in the execution planning, process data acquisition during the excavation and the analysis of advance data in the aftermath.

Keywords: BIM, process controlling, numerical simulation, mechanised shield tunnelling

1 Einleitung

BIM – Building Information Modelling – genießt derzeit große Aufmerksamkeit in der Industrie und der Forschung und hat, zumindest im Hochbau, längst einen unverzichtbaren Stellenwert in der Planung und Bewirtschaftung von Bauwerken eingenommen. Für eine ganzheitliche Anwendung von BIM in Tunnelbauprojekten müssen allerdings noch einige Herausforderungen gemeistert werden, die aktuell im DAUB-Arbeitskreis „BIM im Untertagebau“ diskutiert werden. Eine Veröffentlichung der Ergebnisse des DAUB-Arbeitskreises erfolgt voraussichtlich Ende 2018. Ein wichtiges Thema im Arbeitskreis ist beispielsweise das Vertragswesen im Tunnelbau zwischen Auftraggeber und Auftragnehmer, welches aktuell einen effektiven und ganzheitlichen Einsatz von BIM im Tunnelbau nicht zulässt. Ein Grund hierfür ist die vertraglich klar definierte Verantwortlichkeit, die im möglichen Streitfall zur Klärung der Kostenverteilung herangezogen wird. Ein BIM-Projekt mit einer solchen Vertragsgrundlage ist allerdings nicht umsetzbar, da es bereits in der frühen Projektphase einen regen Austausch zwischen Auftraggeber und Auftragnehmer zur Erstellung des BIM-Modells geben muss. Nichtsdestotrotz gibt es bereits einige Einsatzmöglichkeiten der BIM-Methode, die einen Mehrwert in allen Phasen eines Tunnelbauprojekts – Planungs-, Ausführungs- und Betriebsphase – generiert. Beispiele hierzu werden in diesem Artikel erläutert.

Die Grundlage für ein Building Information Model ist üblicherweise eine dreidimensionale geometrische Beschreibung in unterschiedlichen Detaillierungsgraden. Diese stellt zunächst den nach außen sichtbaren Teil des BIM dar und ermöglicht neben der Visualisierung auch eine leicht begreifbare Navigation durch die Projektinformationen. Auch wenn sich die 3D-Darstellung sinnvoll zum besseren Verständnis komplexer Bauteile einsetzen lässt, ergibt sich der eigentliche Mehrwert eines BIM erst aus der Verknüpfung von Geometrie und Informationen, die sich über alle Leistungsphasen erstrecken. Wenn es gelingt, jede anfallende Information und jeden Messwert zeit- und ortsbasiert eindeutig den entsprechenden geometrischen Beschreibungen aus der 3D-Modellierung zuzuordnen, so lässt sich durch intelligente Datenbankabfragen und Big Data Analysemethoden [1] jederzeit ein sehr genaues Bild vom Soll- und vom Ist-Zustand des Projektes erzeugen. In seiner zeitlichen Entwicklung aufgeschlüsselt, erhält man nun ein transparentes, ganzheitliches digitales

Modell des Tunnelbauprozesses und des Tunnels, mit dem sich die unterschiedlichsten Aufgaben effizient erledigen lassen. Allerdings gilt es, in das BIM-Modell nur notwendige Daten zu integrieren, um dieses nicht zu überladen und somit die Übersichtlichkeit zu verlieren, die ein BIM-Modell so wertvoll macht.

Für den Austausch der digitalen BIM-Modelle zwischen den verschiedenen Softwareherstellern gibt es Bestrebungen, ein einheitliches Datenaustauschformat zu spezifizieren. Das bekannteste Datenaustauschformat für BIM-Modelle ist der STEP-basierte IFC-Standard (Industry Foundation Classes) [2], der ursprünglich für den Hochbau entwickelt wurde, für den es aber viele Erweiterungen für den Infrastrukturbereich gibt. In IFC5 sollen viele dieser Erweiterungen wie IfcTunnel, IfcBridge, IfcRoad oder IfcRail berücksichtigt werden, um den IFC-Standard auch für den Infrastrukturbereich nutzbar zu machen [3].

In der Entwurfsphase sind dies Variantenstudien, Sensitivitätsanalysen und Untersuchungen von Störfallszenarien, die zur Optimierung der Trassierung und der eingesetzten Vortriebsverfahren sowie für die Identifikation von maßgebenden Lastfällen für die Bemessung und die Ausführungsplanung genutzt werden können. Während der Ausführungsplanung, in der auch der Detailgrad des BIM entsprechend höher ist, lassen sich die geometrischen Informationen gemeinsam mit den dort zugeordneten Materialeigenschaften, Belastungsszenarien und Bauzuständen sehr leicht in die entsprechenden Bemessungs- und Simulationsmodelle überführen. Deren Ergebnisse wiederum können erneut den entsprechenden Bauteilen in der Datenbank zugeordnet werden, sodass das ganzheitliche Bild des Tunnels ergänzt wird.

In der Bauphase schließlich kommen die Maschinendaten sowie die Erfassung einer Vielzahl weiterer Informationen als Datenquellen hinzu. Auch hier können alle notwendigen Daten räumlich und zeitlich in das BIM integriert werden. Dadurch wird ein ständiger Soll-Ist-Vergleich ermöglicht, der Anpassungen in beiden Richtungen erlaubt. Weicht die Ausführung von den Planungen ab, so kann dies schnell erkannt und entsprechend korrigiert werden. Weichen die angenommenen Verhältnisse von den vorgefundenen Gegebenheiten ab, so kann ebenso schnell die Modellierungsgrundlage angepasst und eine entsprechende Prognose über das nun zu erwartende Systemverhalten erstellt werden.

Um die vorgenannten Möglichkeiten und damit den eigentlichen Mehrwert von BIM in der Planungs- und Bauphase von maschinell vorgetriebenen Tunneln optimal nutzen zu können, bedarf es jedoch einer klaren und einfachen Datenintegration zwischen allen beteiligten Softwaremodulen und Dienstleistern. Die Datenintegration sollte dabei jederzeit auf Knopfdruck von autorisierten Projektbeteiligten ausgeführt werden können, um komplexen, fehleranfälligen Prozessen vorzubeugen. Um eine zeit- und ortsunabhängige Datenintegration zu gewährleisten, muss diese darüber hinaus online

und auf Knopfdruck automatisiert über sichere und kompatible Schnittstellen erfolgen.

Die folgenden Kapitel beschreiben die Anwendungsmöglichkeiten von BIM in den verschiedenen Phasen eines Tunnelbauprojekts: Planungs-, Ausführungs-, und Betriebsphase mit dem Fokus auf die Planungs- und Ausführungsphase. Es wird ein Ansatz vorgestellt, um Simulationsmodelle aus BIM-Modellen zu extrahieren sowie externe Software mit BIM-Modellen zu verknüpfen. Zum Schluss findet eine Validierung der Ansätze mittels einiger Beispiele statt.

2 BIM in der Planungsphase im Tunnelbau

2.1 Anwendungsbereiche von BIM im Tunnelbau

BIM findet gegenwärtig noch größtenteils in der Planungsphase Anwendung. Es findet eine dreidimensionale Konstruktionsplanung statt, die mit entsprechenden Daten zur Tragwerksplanung, Bauablaufplänen und weiteren Informationen zu einem BIM-Modell zusammengefasst wird. Basierend auf dem generierten Modell können verschiedene Analysen wie Kollisionsprüfungen, Mengenermittlungen oder Bauablaufsimulationen durchgeführt werden.

Besondere Aufmerksamkeit in der Planungsphase von Tunnelbauwerken gilt dem Boden, da dieser entscheidend für das angewandte Bauverfahren oder den Typ der Tunnelvortriebsmaschine ist. Ein dreidimensionales geotechnisches Modell, das aus vorgenommenen Erkundungsbohrungen mit konventioneller Baugrundsoftware generiert werden kann, bildet hier die Entscheidungsgrundlage. Die zu erhebenden Bodenparameter können aus der DAUB-Empfehlung Auswahl von Tunnelvortriebsmaschinen [4] entnommen werden, sollten aber je nach Projekt durch Absprachen erweitert werden, je nachdem ob die in numerischen Modellen verwendeten konstitutiven Modelle spezielle Parameter benötigen. Zusätzlich zu den Baugrundinformationen muss das Bodenmodell Informationen zu den Grundwasser- verhältnissen und Permeabilitäten beinhalten, die besonders für eine Stützdruckberechnung wichtig sind.

Das Bauwerksmodell setzt sich aus der bzw. den Tunnelröhren samt Innenausbau zusammen sowie den angeschlossenen externen Bauwerken wie Stationen oder Rettungsschächten. Es ist in verschiedene Teilmodelle zu unterteilen, um die Größe des Modells zu reduzieren und es dadurch besser handhabbar zu machen. Basierend auf dem Modell kann dann eine Mengenermittlung für eine automatisierte Leistungsabrechnung erfolgen, sowie eine Kollisionsprüfung zwischen den einzelnen Modellobjekten, um frühzeitig Planungsfehler zu erkennen und zu korrigieren.

Bei der Konstruktion der jeweiligen Teilmodelle im Tunnelbau ist auf eine hinreichende Modellqualität zu achten, da heutzutage auf der Baustelle i.d.R. mit zweidimensionalen Plänen gearbeitet wird, die automatisch aus dem BIM-Modell

extrahiert werden können. Diese Extraktion ist nur möglich, wenn die dreidimensionale Modellierung eine hohe Qualität hinsichtlich geschlossener Kanten und anderer geometrischer Eigenschaften hat. Darauf muss insbesondere auch bei Planänderungen geachtet werden. Dies fällt unter die Aufgabe des zuständigen BIM-Koordinators, der die jeweiligen Änderungen freigibt und mit anderen Projektbeteiligten kommuniziert.

2.2 Verknüpfung von BIM mit Simulationsmodellen

Für komplexe Baugrund-, Überdeckungs- oder Bebauungsverhältnisse können für eine detailliertere Analyse Simulationen durchgeführt werden. Ein wesentlicher Zeit- und Kostenfaktor bei der Erstellung von Simulationen ist die Generierung des Simulationsmodells aus den gegebenen Daten. Dieser Faktor kann durch die Extraktion von Daten aus dem BIM-Modell signifikant reduziert werden; dadurch wird die Nutzung numerischer Simulationsmodelle wirtschaftlicher.

2.2.1 Integration von Geometriemodellierung und Simulation

Komplexe Simulationsmodelle erfordern eine Vielzahl projektspezifischer Informationen (geotechnisches Modell einschließlich geotechnischer Parameter, projektbezogene Daten zu Ausbau- und Vortriebsprozess, existierender oberirdischer Bebauung und unterirdischer Infrastruktur etc., siehe z.B. [5]), die üblicherweise in diversen Quellen wie Zeichnungen, Tabellen, Diagrammen oder heterogenen Datenbanken vorliegen. Informationen über die Tunnelgeometrie liegen klassischerweise in Form von CAD-Dateien oder, immer öfter, als BIM-Modell vor, in dem auch weitere relevante Informationen über den Entwurf und die Bauausführung abgelegt werden können [6, 7, 8].

Eine der Herausforderungen bei der Optimierung des Projektentwurfs ist es, die Entwurfs- und Ausführungsvarianten und die zugehörigen numerischen Analysen über unterschiedliche Submodelle und über die Projektzeit hinweg konsistent zu halten. Bis heute ist dies ein fehleranfälliger Prozess, der häufig manuelle Datenkonvertierung in unterschiedlichste Formate beinhaltet. Dazu gehören beispielsweise Koordinatentransformationen zwischen verschiedenen Referenzsystemen oder spezifische Geometriemodellierungsformate von Berechnungswerkzeugen.

Eine effiziente Lösung für dieses Problem ist ein integriertes Entwurfs-Analyse-Werkzeug [9, 10], bei dem numerische Simulationen basierend auf ihrer Geometrie und zugehörigen semantischen Informationen automatisch generiert werden. Die entsprechenden Informationen werden dabei direkt aus BIM-Programmen wie Autodesk Revit [11], Bentley MicroStation [12] und GenerativeComponents [13], Graphisoft ArchiCAD [14] und Rhino-Grasshopper-ArchiCAD Toolset [15] oder Nemetschek Allplan [16] entnommen. Darüber hinaus lässt sich ein mehrskaliges Modellierungskonzept einsetzen, bei dem alle Komponenten des Schildvortriebs

(Baugrund, Vortriebsmaschine, Tunnelschale, Gebäude etc.) effizient mit variablen Detaillierungsgraden (engl.: level of detail, LoD) modelliert werden können.

Dadurch lässt sich beispielsweise auf der Kilometerskala ein grob aufgelöstes Modell für die Tunneltrasse und die umliegenden Gebäude und Infrastrukturbauwerke bilden, während auf einer Zentimeterebene alle Details für die exakte Modellierung eines Querschlags mit Bewehrungsführung einbezogen werden können. Solch ein integriertes, mehrskaliges Modell trägt zur Effizienzsteigerung bei der Modellierung bei, indem es den Aufwand sowohl für die Modellerzeugung als auch die Berechnung minimiert. Änderungen, die sich während des Bauprozesses ergeben, sowie die Aufnahme der Ist-Situation während des Vortriebs können jederzeit in das Gesamtmodell zurückgespielt werden. Dazu werden sowohl Parameter der Geometrie-Teilmodelle als auch mit den einzelnen Bauteilen verknüpfte Datensätze verwendet, die über geeignete Schnittstellen übertragen werden. Eine Beschreibung des hier vorgeschlagenen Verfahrens zur Datenintegration findet sich in Kapitel 5.

2.2.2 Revit-Modelle und Dynamo-Plug-ins für LoD-Modellierungsansatz

Mit dem SATBIM-Framework [17] wurde ein umfassendes Konzept zur Einbindung mehrskaliger Modellrepräsentationen in ein BIM-Modell entwickelt. Hier liegt der Fokus insbesondere in der geometrisch-semantischen Modellierung des maschinellen Schildvortriebs in einer Form, die sich für den direkten Einsatz in numerischen Simulationen eignet.

Dazu wurde ein realistisches Simulationsmodell für den maschinellen Schildvortrieb entwickelt, welches sowohl in der Planungs- als auch in der Bauphase eingesetzt werden kann und alle wesentlichen Komponenten abbildet. Dies sind der Baugrund, die segmentierte Tunnelschale, Stützmaßnahmen an der Ortsbrust und im Ringspalt, die Vortriebsmaschine mit den Vortriebspresen sowie vorhandene Bauwerke und Infrastruktur in der Umgebung des Tunnels.

Für jede Modellkomponente sind drei Detaillierungsgrade (LoDs) definiert: niedrig (LoD 1), mittel (LoD 2) und hoch (LoD 3). Der niedrigste LoD ist eine nicht-volumetrische Repräsentation der Komponente, bei der beispielsweise Gebäude nur durch ihre Grundfläche und die Tunnelschale sowie die Vortriebsmaschine nur durch Flächen abgebildet werden. Bei LoD 2 wird für die Komponenten ein volumetrisches Modell erzeugt, welches der tatsächlichen räumlichen Ausdehnung, jedoch mit einer vereinfachten Geometrie entspricht. LoD 3 enthält schließlich genauere Details der tatsächlichen Geometrie. Auch semantische Informationen wie Prozessparameter werden in unterschiedlichen LoDs abgebildet. Dabei wird die bei der Simulation erforderliche räumliche und zeitliche Auflösung oder die Notwendigkeit zeitabhängiger Effekte berücksichtigt. In innerstädtischen Tunnelbauprojekten kann

ein unterschiedlicher Detaillierungsgrad bei der Berücksichtigung der oberirdischen Bebauung durchaus zu unterschiedlichen Einstufungen in Risikoklassen für die einzelnen Bauwerke führen [18].

Um die Konsistenz des Modells bei der Verwendung unterschiedlicher Detaillierungsgrade sicherzustellen, sind alle Komponenten durch hierarchische Parametersätze definiert. Dabei wird für niedrigere LoDs jeweils nur eine Teilmenge der entsprechenden Parametersätze verwendet, während die höchsten LoDs alle enthaltenen Parameter verwenden. Beispiele für unterschiedliche LoDs bei ausgewählten Komponenten sind in Abb. 1 zu sehen. Die technische Umsetzung erfolgt mittels DYNAMO-Plugins [10, 19]. Durch Kombination der Objekte aller individuellen Komponenten in ihren jeweiligen Detaillierungsgraden entsteht das vollständige Tunnelinformationsmodell (TIM). Der Ansatz zum TIM wurde in [8] zur Zusammenfassung von wesentlichen Informationen zur digitalen Planung von Tunnelbauprojekten entwickelt.

2.2.3 Effiziente vortriebsbegleitende numerische Simulation

Das Konzept zur simulations- und monitoringbasierten Prognose von Vortriebsparametern im Zuge des Tunnelvortriebs beinhaltet die drei Phasen: Ersatzmodellerstellung (vorab), monitoringbasiertes Ersatzmodellupdate (prozessbegleitend) und Prozessparameterprognose (vorausschauend). In der ersten Phase wird vor Beginn der Vortriebsarbeiten ein numerisch effizientes Ersatzmodell mit den Projektcharakteristika (Geometrie, Material etc.) für die relevanten bzw. kritischen Projektabschnitte generiert. In der zweiten Phase wird das Ersatzmodell mit gemessenen Daten aus der geodätischen Überwachung bzw. den Setzungsmessungen baubegleitend aktualisiert. Die aktualisierten Material- und Geometrieparameter werden in der dritten Phase genutzt, um vortriebsbegleitend Steuerzielgrößen (z.B. zukünftige Setzungen) zu prognostizieren.

Durch den Einsatz von effizienten Metamodellen anstelle komplexer dreidimensionaler Finite-Elemente-Modelle kann die Performance der Berechnung zusätzlich um ein Vielfaches gesteigert werden. Im Gegenzug sinkt die Genauigkeit der Berechnungsergebnisse, sobald der Parameterraum, für den die Metamodelle trainiert wurden, verlassen wird. Im Rahmen der Forschungsarbeiten im Sonderforschungsbereich „Interaktionsmodelle für den maschinellen Tunnelbau“ an der Ruhr-Universität Bochum [20] wurden Metamodelle mit einer großen Anzahl von Simulationsläufen auf Basis des prozessorientierten Vortriebsmodells *ekate* [18] trainiert, die in der Designphase eines Projektes durchgeführt werden könnten.

Das zuvor vorgestellte SATBIM-Framework kann auch dazu verwendet werden, um die große Zahl von Simulationsmodellen mit den erforderlichen Entwurfsvarianten

effizient zu erzeugen (siehe Abb. 2). Die hieraus generierten Simulationsergebnisse wurden dann für eine ausgewählte Gruppe von Parametern zum Anlernen eines Metamodells mit bestimmten Lernalgorithmen verwendet.

Um die zahlreichen und oft unübersichtlichen Simulationsergebnisse effizient darzustellen, werden in SATBIM die Simulationsergebnisse über einen benutzerdefinierten Algorithmus in DYNAMO [19] ausgewertet und dann visualisiert. Dies ermöglicht eine umfassende, intuitive und verständliche Sichtung der Ergebnisse durch den Benutzer, wodurch Einflüsse von Steuerungs- oder Ausführungsentscheidungen auf Sicherheit und Leistung des Tunnelvortriebs rasch ausgewertet werden können. Ein Beispiel für die hier vorgestellten Visualisierungsmethoden findet sich in Abb. 3.

2.2.4 Integration von Daten aus dem BIM-Modell in eine Simulationsumgebung

Die Verknüpfung des BIM-Modells mit der Simulationsumgebung wird mit einem Dynamo-Plugin realisiert. Mit Hilfe des Plugins wird das Modell in ein Format exportiert, welches die automatisierte Erzeugung eines Simulationsmodells ermöglicht. Dazu werden die Geometrieinformationen als ACIS-Dateien (Volumina, Flächen, Linien und Punkte) exportiert, während die komponentenspezifischen Parameter und semantischen Informationen in Form von Textdateien in einem Schlüssel-Wert-Format ausgetauscht werden.

Für den generischen Austausch von Informationen zwischen Programmen über das Internet eignen sich Webservices, die über geeignete Schnittstellen, beispielsweise über JSON-Objekte (JavaScript Object Notation [21]), miteinander kommunizieren. JSON ist ein kompaktes Datenformat, das standardmäßig für den Austausch von Daten zwischen Webanwendungen verwendet wird.

Für jede Tunnelkomponente wird ein numerisches Modell für den entsprechenden LoD erzeugt. Dabei werden die Geometrie und die Materialeigenschaften, die Randbedingungen und Schnittstellen zu anderen Komponenten sowie der Bauprozess berücksichtigt. Der SATBIM-Modeller ermöglicht dabei die automatische Erzeugung und Initialisierung sowie die Ausführung einer numerischen Simulation. Nach Abschluss der Simulation können die Rechenergebnisse wieder zurückgegeben und dort visualisiert werden. Abb. 4 zeigt den Datenfluss in SATBIM.

3 BIM in der Ausführungsphase im Tunnelbau

3.1 Anwendungsbereiche von BIM in der Ausführungsphase

In der Ausführungsphase eines Tunnelbauprojekts wird das BIM-Modell kontinuierlich aktualisiert, um neu gesammelte Informationen zu integrieren oder Änderungen im Modell einzutragen, die aufgrund geänderter Gegebenheiten notwendig sind. Hier ist

es entscheidend, darauf zu achten, dass die Modellqualität beibehalten wird und alle durchgeführten Änderungen von allen beteiligten Parteien bestätigt und freigegeben werden, da das BIM-Modell auch als Abrechnungsgrundlage verwendet werden kann, um beispielsweise die eingebauten Massen abzurechnen.

Eine besondere Herausforderung ist die Aktualisierung des Bodenmodells. Durch das Fortschreiten der Vortriebsmaschine erhält man immer mehr Informationen über die Bodeneigenschaften. Diese Daten können allerdings je nach Baugrund nur schwer direkt, z.B. durch Daten aus der Separieranlage, identifiziert werden und für die Aktualisierung von Bodenmodellen genutzt werden. Ein detailliertes und exaktes Bodenmodell ist für ein Tunnelprojekt allerdings elementar wichtig, da viele Nachträge sich auf das Bodenmodell berufen, wenn dieses von dem ursprünglichen, in der Planung verwendeten Bodenmodell abweicht. Im konventionellen Tunnelbau findet sogar eine direkte Abrechnung über das Bodenmodell bzw. die Bodenklassen statt.

Während der Bauphase wird der Baubetrieb kontinuierlich überwacht. Hierzu wird verschiedenste Software für das Controlling verwendet, die neben Maschinendaten die Daten aus Setzungsmessungen und geodätischer Überwachung beinhalten. Mit Hilfe der in der Planungsphase trainierten Ersatzmodelle können diese Daten genutzt werden, um die Modellparameter des Vortriebsmodells während des Vortriebs laufend an die tatsächlichen Bodenverhältnisse anzupassen [22, 23] (siehe Abschnitt 2.2.2). Da die Controllingsoftware nicht immer eine direkte Schnittstelle zum BIM-Modell hat, die die dreidimensionalen Teilmodelle des BIM-Modells verarbeiten kann, müssen externe Schnittstellen geschaffen werden, um Daten aus externen Programmen in das BIM-Modell einzuspeisen (siehe Kapitel 3.2). Durch die Integration von solchen Ist-Daten können mit dem BIM-Modell dann sogenannte Soll-Ist-Vergleiche gefahren werden, um die Performance des Projekts zu bewerten. Des Weiteren können im BIM-Modell Leistungsevaluierungen sowie Baufortschrittsanalysen vorgenommen werden, indem die Fertigstellungsdaten von Bauteilen in das Modell integriert und dann mit Daten aus der Terminplanung abgeglichen werden. Im maschinellen Tunnelbau kann diese Operation größtenteils automatisch über ein Segmenttracking erfolgen, bei dem der Lebenszyklus von Tübbingsegmenten vollständig, von der Herstellung bis zum Einbau, nachverfolgt wird. Im BIM-Modell kann dann der jeweilige Status eines Segments dargestellt werden bis hin zu beschädigten Segmenten und Reparaturaufträgen.

3.2 Integration von externer Software

Die in Kapitel 3.1 vorgestellten Aspekte von BIM im Tunnelbau legen dar, wie BIM-Konzepte bereits heute in der Planungsphase und während des Tunnelvortriebs eingesetzt werden können. Für die nähere Zukunft ist es daher eine logische Konsequenz, existierende Programme miteinander zu verzahnen und so dem Kerngedanken des BIM Rechnung zu tragen, dass sich sämtliche Informationen zu

einem Projekt in ein gemeinsames Datenkonzept einbinden und so synergetisch nutzen lassen sollen.

Im Folgenden wird kurz auf das Prozesscontrolling mit der dazugehörigen Software eingegangen, das ein wesentlicher Bestandteil jedes Vortriebs ist, um danach eine Möglichkeit vorzustellen, diese Software mit dem BIM-Modell zu verknüpfen und somit einen Datenaustausch zu realisieren.

3.2.1 Prozesscontrolling

Um einen effizienten und sicheren Vortrieb gewährleisten zu können, ist die Überwachung des Vortriebsprozesses zwingend erforderlich. Tunnelvortriebsmaschinen sind mit einer Vielzahl von Sensoren ausgestattet, deren Messwerte kontinuierlich, oder in kurzen Intervallen von wenigen Sekunden, automatisch aufgezeichnet werden. Die anfallende Datenflut kann nur dann für die Überwachung und Optimierung des Vortriebs, das sogenannte Prozesscontrolling, herangezogen werden, wenn ihre Semantik sowie die örtliche und zeitliche Verortung berücksichtigt und von einer Auswertungssoftware übersichtlich und verständlich aufbereitet werden (siehe Abb. 5) [24]. Die Analyse der Daten kann hierbei sehr vielfältig sein. Es können Daten aus zurückliegenden Bauphasen zur Analyse von Problemen evaluiert werden, oder die Tunnelvortriebsmaschine wird in Echtzeit überwacht, wobei zeitgleich entsprechende Echtzeitanalysen laufen.

Letztlich stellt ein solches Prozesscontrolling-System bereits ein BIM im weiteren Sinne dar, da hier semantische Informationen mit einem, hier auf die Tunneltrasse reduzierten, geometrischen Modell des Tunnels verknüpft werden.

Zur Implementierung eines solchen zentralen, weltweit erreichbaren Prozesscontrolling-Systems wird eine Webapplikation benötigt, auf die via Internet von jedem Ort aus zugegriffen werden kann. Ein flexibler Zugriff auf die Daten ist wichtig, um sowohl unterschiedlicher Software als auch verschiedenen Benutzern die Daten jederzeit und von überall für Analysen und Berechnungen zur Verfügung zu stellen. Ein weiterer Vorteil einer Webapplikation ist die Vielfalt an Schnittstellen, die diese für die unterschiedlichen Datenanfragen bereitstellen kann. Die Benutzer greifen mit dem Browser mittels Webseiten auf die Daten zu. Sie brauchen dabei keine neue Software zu installieren und können überall von verschiedenen Endgeräten Daten abrufen. Softwareapplikationen, die Daten für Berechnungen oder Auswertungen benötigen, können in der Regel nicht eigenständig Daten über eine Webseite herunterladen. Diese greifen auf sogenannte REST (Representational State Transfer) Schnittstellen von integrierten Webservices der Webapplikation zurück. REST beschreibt einen Standard, um Webservices zu implementieren, wobei hierbei der Fokus auf der Kommunikation zwischen Maschine und Maschine liegt. Mittels einer

REST-Anfrage können Daten gelesen, bearbeitet, erzeugt und gelöscht werden. Externe Softwareprogramme können somit, unter Anwendung der implementierten REST-Struktur, Vortriebsdaten extrahieren, ihre Analysen und Berechnungen durchführen und dann ihre Ergebnisse zurückschreiben. Abbildung 6a) zeigt die grobe Architektur der Webapplikation.

3.2.2 Schnittstellenmöglichkeiten zwischen BIM-Modellen und externer Software

Die Erstellung und Bearbeitung von BIM-Projekten wird in der Regel mit den in Kapitel 2.2.1 erwähnten Softwarewerkzeugen realisiert. Diese Softwarewerkzeuge finden allerdings hauptsächlich in der Planung Anwendung, wo ihre mächtigen Werkzeuge für die Konstruktion von Bauwerken besonders gefragt sind. Während der Ausführungsphase auf der Baustelle werden allerdings weitestgehend nur Daten zwischen dem BIM-Modell und externen Anwendungen ausgetauscht, um den Vortrieb zu überwachen, Prozesse zu koordinieren oder Leistungen abzurechnen. Hierfür werden keine Konstruktionswerkzeuge verwendet, sodass es sich anbietet, einfachere, übersichtlichere und kostengünstigere BIM-Anwendungen zu verwenden. Ein Beispiel hierfür ist die Software Desite MD [25], die über einen effizienten Viewer zur Darstellung von BIM-Modellen verfügt und zudem eine JavaScript-Schnittstelle besitzt, um projektspezifische Auswertungsformulare zu erstellen.

Die JavaScript-Schnittstelle bietet zudem die Möglichkeit, über spezifische Formulare Daten aus externen Quellen automatisiert in das Modell zu integrieren. Die Formulare werden spezifisch für die Implementierung von Schnittstellen konzipiert und umgesetzt. Eine bidirektionale Kommunikation zwischen einer BIM-Modellierungssoftware und einer externen Webapplikation für Simulationen oder Prozesscontrolling kann somit über so eine JavaScript-Schnittstelle realisiert werden, wobei häufig JSON als Datenaustauschformat angewendet wird.

In einem JavaScript-basierten Formular werden spezifische REST-Anfragen definiert, die auf die entsprechende Schnittstelle der Webapplikation abgestimmt sind. Dadurch ist es möglich, Informationen sowohl an die Webapplikation zu übertragen als auch Daten anzufordern. Somit kann das BIM beispielsweise die tatsächliche Ausbruchs- und Ringbaugeometrie von der Webapplikation anfordern und dadurch einen Ist-Zustand im Modell darstellen. Auf der anderen Seite schreibt die BIM-Modellierungssoftware Soll-Daten nach einem Update in die Webapplikation, um dort sofort Soll-Ist-Vergleiche von Sensormessungen durchzuführen.

3.3 Umsetzung von Schnittstellen zur Datenintegration

Abb. 6b) zeigt den generellen Aufbau der Kommunikation zwischen einer BIM-Software und einer Webapplikation für Prozesscontrolling. Der Austausch der Daten findet über REST-Schnittstellen statt, wobei Informationen mittels JSON übertragen

werden. Das JavaScript-Formular kann dieses Format interpretieren und hieraus weitere Schritte ableiten, wie beispielsweise die Manipulation des BIM-Modells. Die Manipulationen erfolgen über die JavaScript-basierte Programmierschnittstelle (API) des BIM-Modells. Hierüber können sowohl Änderungen an der Geometrie (z.B. das Einfärben von Objekten) als auch die Anpassung der semantischen Informationen von Modellobjekten vorgenommen werden.

4 BIM in der Betriebsphase im Tunnelbau

In der Betriebsphase eines Tunnelbauprojekts sind alle Bauvorgänge abgeschlossen und das BIM-Modell kann für die Dokumentation und Wartung des Bauwerks eingesetzt werden. Hier ist in den jeweiligen Projekten zu klären, welche Informationen in dem übergebenen BIM-Modell enthalten sein sollen, da während der Planungs- und Bauphase viele Informationen in das Modell integriert wurden, die für die Betriebsphase nicht wichtig sind.

In der Betriebsphase wird das BIM-Modell hauptsächlich für die Wartung des Bauwerks eingesetzt. Im Modell können Wartungszyklen für die jeweiligen Bauteile und Elemente für Beleuchtung, Ventilation etc. terminiert werden. Des Weiteren sind im BIM-Modell sämtliche Informationen, die für die Durchführung der Wartung des jeweiligen Bauteils benötigt werden, abgelegt.

Bei aufgetretenen Schäden am Bauteil kann das BIM-Modell zudem ebenfalls verwendet werden, um beispielsweise die Historie des betreffenden Bauteils zu analysieren. Ist während der Bauphase an diesem Bauteil bereits ein Schaden entstanden oder es wurde widrigen Umständen ausgesetzt (z.B. zu hohen Pressenkräften), kann die Beseitigung des Schadens in die Gewährleistung fallen.

Darüber hinaus dokumentiert das BIM-Modell das vorhandene Bauwerk. Somit kann das BIM-Modell für zukünftige Bauprojekte, die sich im Einflussbereich des Bauwerks befinden, in der Planungsphase als Einflussgröße verwendet werden.

5 Beispielszenarien

5.1 Simulationsbasierte Vortriebsoptimierung

Ein komplexes Beispiel für die simulationsbasierte Vortriebsoptimierung ist in Abb. 7 skizziert. Hier werden vortriebsbegleitend aktualisierte Metamodelle mit einem Prozesscontrolling-System verbunden und Parameteridentifikation sowie Optimierungsstrategien in Echtzeit auf numerische Modelle angewandt. Zunächst wird ein Metamodell erzeugt, welches die Modellierungsfunktionen des SATBIM-Frameworks nutzt. Die im Prozesscontrolling-System erfassten Vortriebs- und Monitoringdaten werden im zweiten Schritt verwendet, um die Modellparameter so anzupassen, dass die Modellergebnisse die Kontrollmesswerte (in diesem Fall

Setzungsmessungen) reproduzieren. Im dritten Schritt werden dann die Vortriebsparameter durch Optimierungsalgorithmen so optimiert, dass die vortriebsinduzierten Setzungen minimiert werden. Die Zielfunktion wird dabei durch das Metamodell ausgewertet, was in einer sehr hohen Recheneffizienz resultiert. Die Ergebnisse der Parameteroptimierung können dann als Steuerungsvorschläge über das Prozesscontrolling-System zurück an die Vortriebsmannschaft übermittelt werden.

Ein anderes Beispiel ist die numerische Ermittlung von in der Tunnelröhre verbleibenden Längskräften aus den Vortriebskräften. Diese können nicht unmittelbar gemessen werden, liefern aber zur Abschätzung der Dichtigkeit und der Steifigkeit der Tunnelröhre in Längsrichtung wertvolle Informationen. Mit geeigneten numerischen Modellen können die verbleibenden Längskräfte aus der Belastungsgeschichte ermittelt werden. Dazu werden die aufgezeichneten Daten an ein zuvor aufgesetztes Metamodell übermittelt, welches dann die entsprechend verbleibenden Kräfte berechnet (siehe Abb. 8). Ein ähnliches Modell ohne direkte Anbindung an das Prozesscontrolling wurde beispielsweise in [26] verwendet.

5.2 Soll-Ist-Vergleich aus Modellierungs- und Prozessdaten

Ein Beispiel mit Desite MD als BIM-Software und der Webapplikation PROCON [24] als Software für das Prozesscontrolling zeigt, wie die Anbindung externer Software an ein BIM-Modell aussehen kann. Der Datenaustausch zwischen den beiden Softwarelösungen findet über definierte REST-Schnittstellen statt. In den JavaScript-Formularen werden diese Schnittstellen implementiert und über sogenannte AJAX-Calls ausgeführt. PROCON stellt für diese Anfragen eine API zur Verfügung, durch die gewisse Parameter in der generierten URL übergeben werden können, um die Anfrage zu parametrisieren. Die Antwort auf die Datenanfrage kann in den JavaScript-Formularen dynamisch verarbeitet werden. Durch die bereitgestellte API zum BIM-Modell kann in den Formularen das BIM-Modell je nach Antwort von der Prozesscontrolling-Software manipuliert werden, wie beispielsweise durch das Hinzufügen weiterer semantischer Informationen zu bestimmten Objekten.

Ein einfaches Beispiel hierfür ist die Visualisierung des Baufortschritts mit zusätzlichen Informationen zur Terminplanung. Dabei werden die aktuell gebauten Ringe im BIM-Modell hervorgehoben, um den Fortschritt zu visualisieren. Des Weiteren wird durch eine farbliche Hervorhebung verdeutlicht, wie weit sich der Vortrieb von der Terminplanung entfernt hat. Das Ergebnis ist in Abbildung 9 dargestellt. Hier wird ein Ausschnitt einer Tunnelröhre in einem Farbspektrum von Grün bis Rot visualisiert, wobei Grün die Einhaltung des Terminplans symbolisiert und Rot eine deutliche Überschreitung. Hierbei ist zu beachten, dass je nach Ereignis der Terminplan dementsprechend aktualisiert wird und daher immer nur die Situation zu einem bestimmten Zeitpunkt darstellt. Für die Umsetzung dieser Visualisierung gibt es

ein spezifisches JavaScript-basiertes Formular in der Desite MD-Software, das die entsprechenden Ringinformationen mittels einer REST-Query bei der PROCON-Software anfragt. PROCON verarbeitet die Anfrage, liest die angefragten Informationen aus seiner Datenbank und schickt die Daten zurück an Desite MD. Das Formular in Desite MD interpretiert die zurückgegebenen Daten und greift auf das BIM-Modell mittels der verfügbaren API zu. Es identifiziert die Ringe anhand deren Objekttyps sowie der an das Objekt angehängten semantischen Informationen und färbt diese entsprechend ihres Status ein. Die terminlichen Informationen werden ebenfalls aus den semantischen Informationen des Objektes gelesen. Da es sich bei den JavaScript-Formularen um spezifisch zugeschnittene Formulare für genau definierte Anfragen handelt, werden hier die jeweiligen Schlüsselwörter hinterlegt, um die benötigten terminlichen Informationen von den anderen Informationen des Objektes zu filtern.

6 Fazit

Die in den vorangegangenen Kapiteln vorgestellten BIM-Projekte für den maschinellen Schildvortrieb zeigen, dass es eine Vielzahl von Anwendungen für BIM im Tunnelbau gibt, die über eine reine 3D-Visualisierung deutlich hinausgehen und auch vortriebsbegleitend sinnvolle Einsatzmöglichkeiten bieten. Durch offen gestaltete Schnittstellen und zunehmend kompatible Datenaustauschformate lassen sich unterschiedlichste Anwendungen kombinieren und können auf derselben Datenbasis miteinander kooperieren. Dies vereinfacht nicht nur die Datenhaltung und -konsistenz, sondern eröffnet auch die Möglichkeit, komplexe Fragestellungen in kurzer Zeit mit hochentwickelten Softwarewerkzeugen zu bearbeiten.

7 Danksagung

Für Teile der hier präsentierten Forschungsarbeiten wurde finanzielle Unterstützung durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) im Rahmen des Teilprojekts C1 des Sonderforschungsbereichs SFB 837 "Interaktionsmodelle für den maschinellen Tunnelbau" gewährt. Das SATBIM-Projekt wurde durch das Horizon 2020 Forschungsprogramm der Europäischen Union im Rahmen des Marie-Sklódowska-Curie-Stipendiums Nr. 702874 gefördert. Die Autoren danken für diese Unterstützung.

Literatur

- [1] Toll, D.G., Zhu, H., Osman, A., Coombs, W., Li, X., Rouainia, M. (eds.): 2nd International Conference on Information Technology in Geo-Engineering (2014), ISBN: 978-1-61499-417-6.
- [2] BuildingSMART: IFC Introduction. <https://www.buildingsmart.org/about/what-is-openbim/ifc-introduction/> (2017).
- [3] Amann, J., Borrmann, A.: Open BIM for Infrastructure – mit OKSTRA und IFC Alignment zur internationalen Standardisierung des Datenaustausches. In: Tagungsband zum 6. OKSTRA-Symposium, Köln, Deutschland (2015).

- [4] DAUB: Empfehlungen zur Auswahl von Tunnelvortriebsmaschinen, <http://www.daub-ita.de/fileadmin/documents/daub/gtcrec1/gtcrec11.pdf> (2010)
- [5] *Alsahly, A., Marwan, A., Gall, V., Scheffer, M., König, M., Meschke, G.* BIM-to-FEM: Incorporating Numerical Simulations into BIM Concepts with Application to the Wehrhahn-Line Metro in Düsseldorf, (2018), World Tunnel Conference WTC 2018, im Druck.
- [6] *Borrmann, A., Flurl, M., Jubierre, J.R., Mundani, R.-P., Rank, E.*: Synchronous collaborative tunnel design based on consistency-preserving multi-scale models. *Advanced Engineering Informatics* 28 (2014), H. 4, S. 499-517.
- [7] *König, M., Rahm, T., Nagel, F., Speier, L.*: BIM-Anwendungen im Tunnelbau. *Digitale Planung und Ausführung von Tunnelbauprojekten. Bautechnik* 94 (2017), H. 4, S. 227-231.
- [8] *Koch, C., Vonthron, A., König, M.*: A tunnel information modelling framework to support management, simulations and visualisations in mechanised tunneling projects. *Automation in Construction* 83 (2017), S. 78-90.
- [9] *Stascheit, J., Koch, C., Hegemann, F., König, M., Meschke, G.*: Process-oriented simulation of mechanized tunnelling using an IFC based tunnel product model. *Proceedings of the 13th International Conference on Construction Applications of Virtual Reality (CONVR), London* (2013), S. 613-620.
- [10] *Meschke, G., Freitag, S., Alsahly, A., Ninić, J., Schindler, S., Koch, C.*: Numerical Simulation in Mechanized Tunneling in Urban Environments in the Framework of a Tunnel Information Model, *Bauingenieur* 89 (2014), H. 11, S. 457-466.
- [11] AUTODESK, Autodesk Revit, <http://www.autodesk.co.uk/products/revitfamily/> (2017).
- [12] BENTLEY, Bentley MicroStation, <https://www.bentley.com/en/products/productline/modeling-and-visualization-software/microstation> (2017).
- [13] BENTLEY, Bentley GenerativeComponents, <https://www.bentley.com/en/products/productline/modeling-and-visualization-software/generativecomponents> (2017).
- [14] GRAPHISOFT, Graphisoft ArchiCAD, <http://www.graphisoft.com/archicad/> (2017).
- [15] GRAPHISOFT, Rhino-Grasshopper-ArchiCAD toolset, <http://www.graphisoft.com/archicad/rhino-grasshopper/> (2017).
- [16] NEMETSCHEK, Nemetschek Allplan, <http://www.allplan.com/> (2017).
- [17] *Ninić, J., Koch, C., Stascheit, J.*: An integrated platform for design and numerical analysis of shield tunnelling processes on different levels of detail. *Advances in Engineering Software* 112, (2017), S. 165-179.
- [18] *Alsahly, A., Stascheit, J., Meschke, G.*, Advanced finite element modeling of excavation and advancement processes in mechanized tunneling, *Advances in Engineering Software*, 100 (2016), S.198-214.
- [19] *Jezyk, M.*: the Dynamo Development team at Autodesk, *The Dynamo Primer. V.1.1.0*, AUTODESK, <http://dynamoprimer.com/> (2016).
- [20] *Meschke, G.*: From Advance Exploration to Real Time Steering of TBMs: "A review on pertinent research in the Collaborative Research Center "Interaction Modeling in Mechanized Tunneling", *Underground Space* (2018), im Druck.
- [21] *Keller, S.*: *JSON Book: Easy Learning of JavaScript Standard Object Notation*, CreateSpace Independent Publishing Platform (2016).
- [22] *Ninić, J., Freitag, S., Meschke, G.*: A hybrid finite element - surrogate modelling approach for simulation and monitoring supported TBM steering. *Tunnelling and Underground Space Technology* 63 (2017), S. 12-18.
- [23] *Cao, B.T., Freitag, S., Meschke, G.*: A hybrid RNN-GPOD surrogate model for real-time settlement predictions in mechanised tunneling. *Advanced Modeling and Simulation in Engineering Sciences* (2016), H. 3. S. 1-22.
- [24] *Maidl, U., Stascheit, J.*: Real time process controlling for EPB shields/Echtzeit-Prozesscontrolling bei Erddruckschilden. *Geomechanik und Tunnelbau* 7 (2014), S. 64-71.

[25] Ceapoint, Desite MD / MD Pro – CEAPPOINT GmbH,

<https://www.ceapoint.com/desite-md-md-pro/>

[26] Ninić, J., Meschke, G.: Simulation based evaluation of time-variant loadings acting on tunnel linings during mechanized tunnel construction. Engineering Structures 135 (2017), S. 21-40.

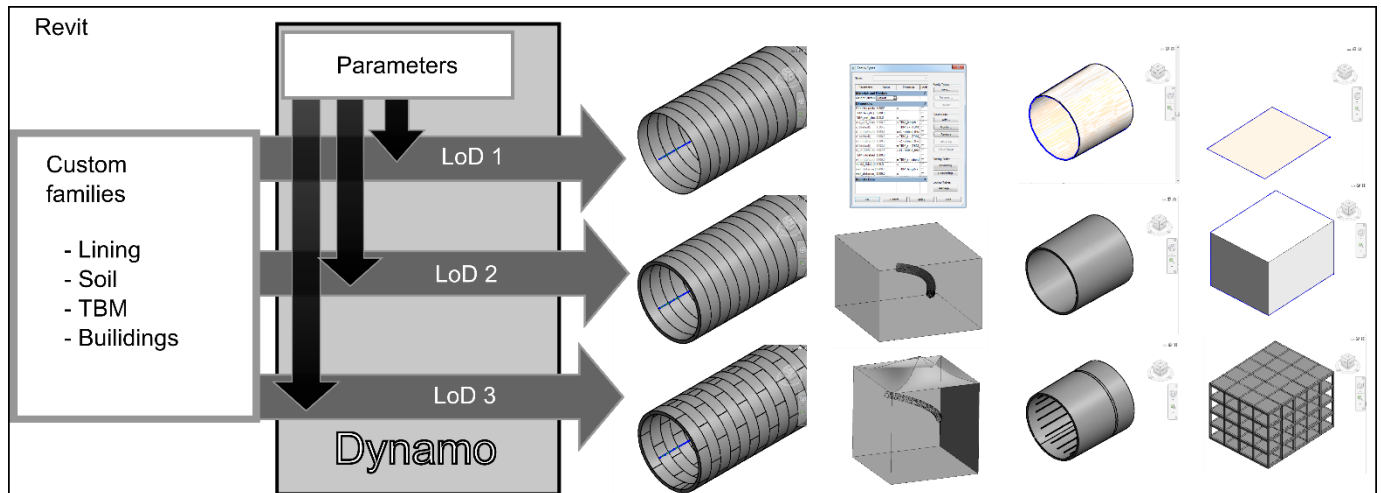


Fig. 1. Multilevel representation of geometry: generation of model components on different LoDs and parameter consistency between different LoDs for individual components

Bild 1. Mehrstufige Geometrie-Repräsentation: Generierung von Modellkomponenten in unterschiedlichen Detaillierungsgraden (LoD) samt konsistenter Parameter zwischen unterschiedlichen LoDs für die jeweiligen Komponenten

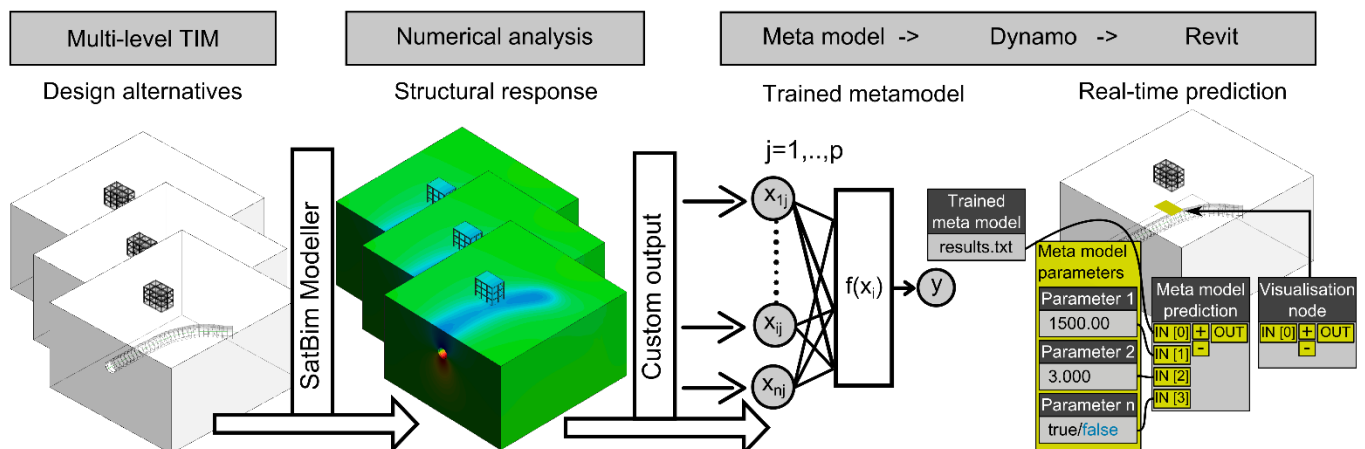


Fig. 2. Scheme of the real-time prediction of the tunneling-induced effects

Bild 2. Schema der Echtzeitprognose von vortriebsinduzierten Effekten

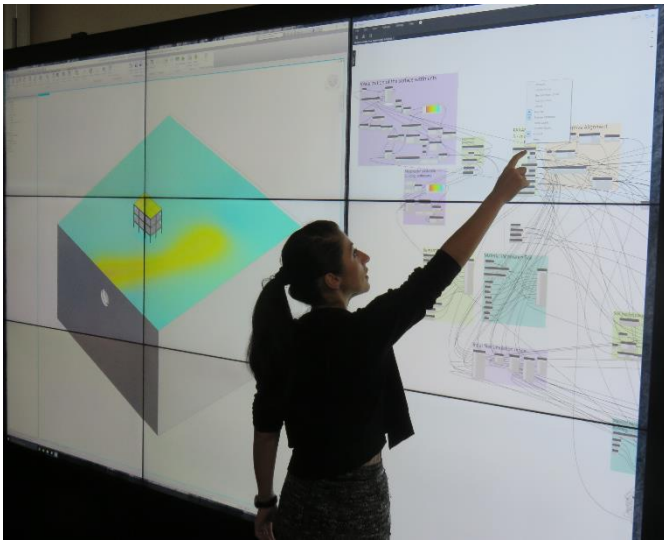


Fig. 3. Visualisation of simulation results and real-time assessment of the design alternatives on a multi-touch video wall [15]

Bild 3. Visualisierung von Simulationsergebnissen und Echtzeitbewertung von Entwurfsalternativen mit einer Multi-Touch-Videowand [15]

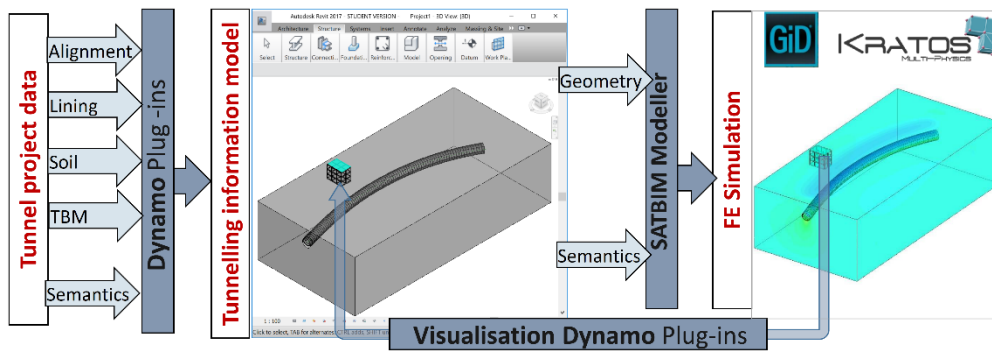


Fig. 4. Workflow and implementation of the SATBIM framework: model generation and visualisation of simulation results in Revit

Bild 4. Workflow und Implementierung des SATBIM-Frameworks: Erzeugung des Simulationsmodells und Ergebnisvisualisierung in Revit

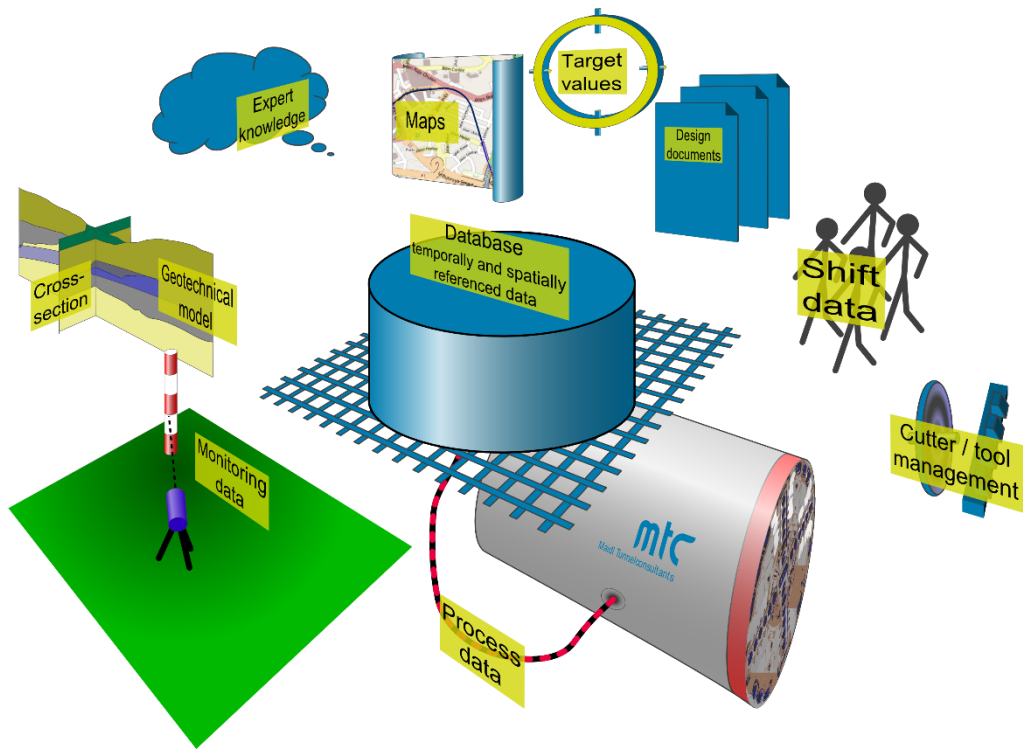


Fig. 5. Data sources in process controlling [23]

Bild 5. Datenquellen im Prozesscontrolling [23]

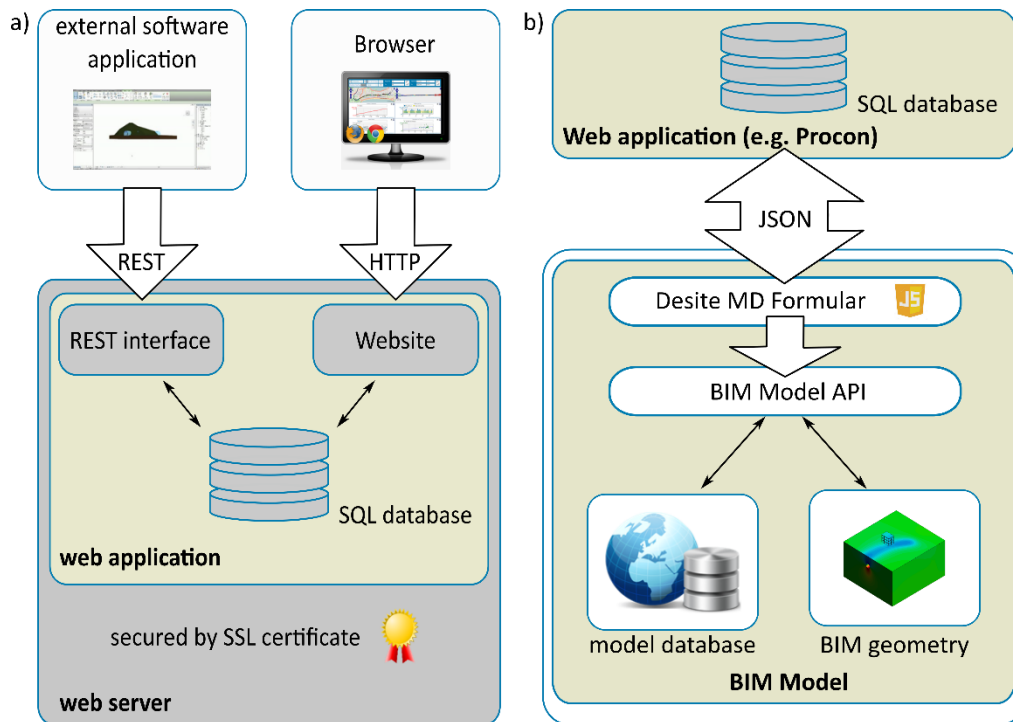


Fig. 6. a) Architecture of the process controlling web application; b) Communication scheme of the integration of project data acquisition and BIM based project representation

Bild 6. a) Architektur der Prozesscontrolling-Webapplikation; b) Kommunikationsschema bei der Integration von Projektdatenerfassung und BIM-basierter Projektrepräsentation

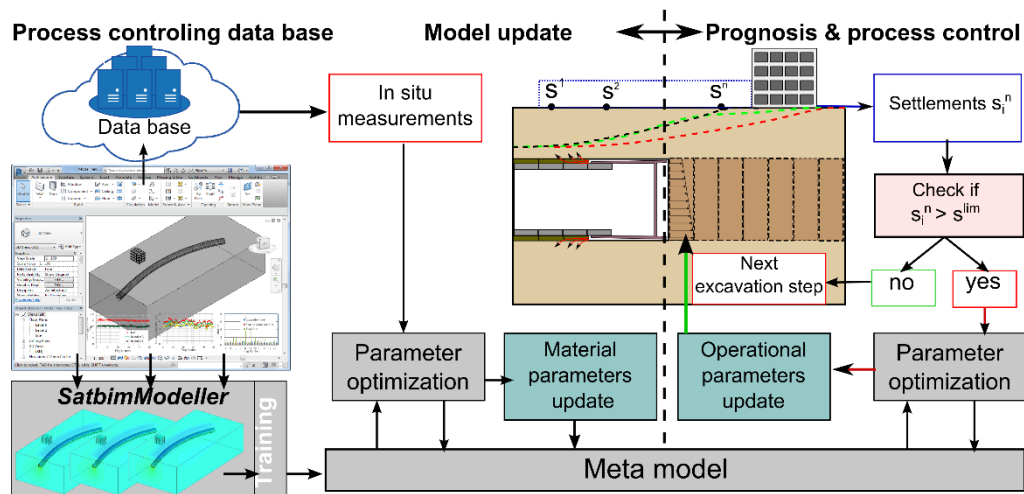


Fig. 7. Model update and adjustment of process parameters by means of simulation-based meta models

Bild 7. Modellupdate und Anpassung der Vortriebsparameter durch simulationsbasierte Metamodelle

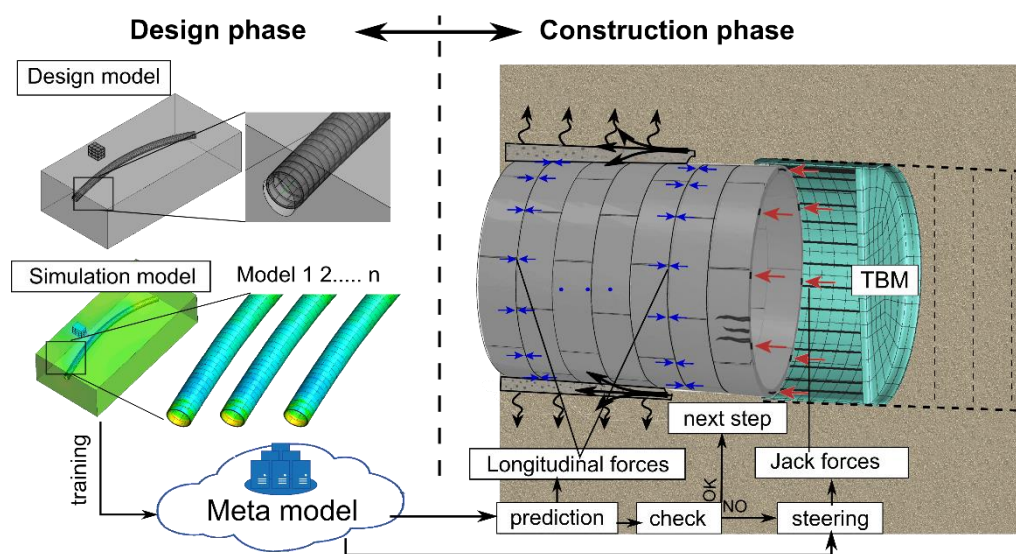


Fig. 8. Determination of permanent axial forces from machine data recordings

Bild 8. Ermittlung bleibender Längskräfte aus Maschinendatenaufzeichnungen

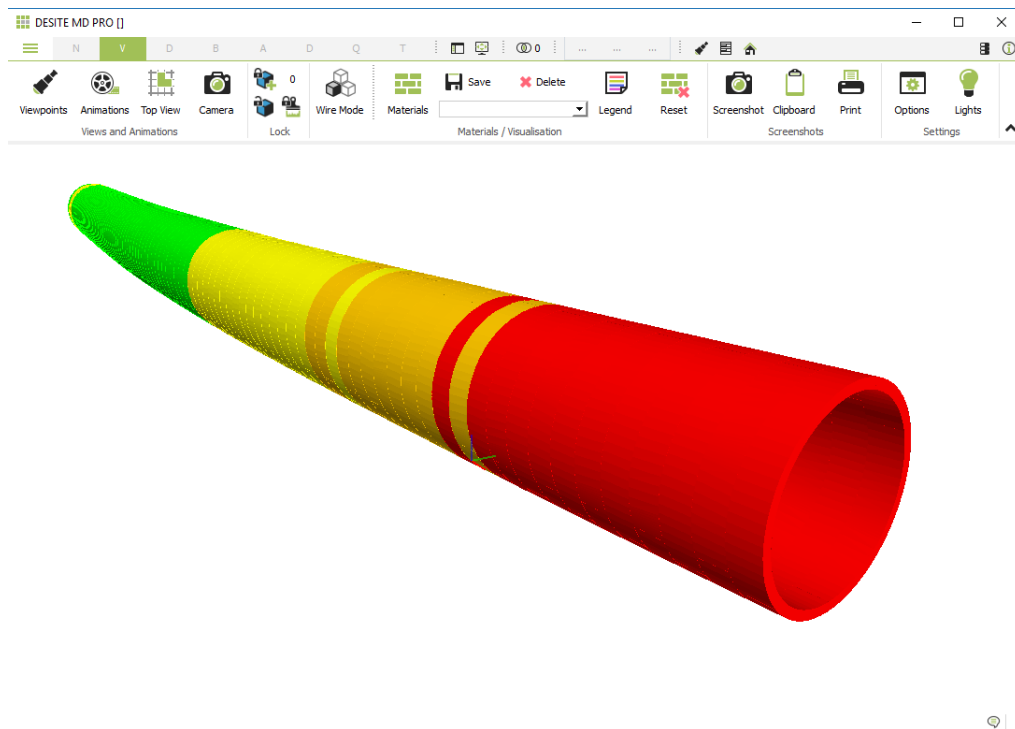


Fig. 9. Processed tunnel model colored with respect to the scheduling of the construction management.

Bild 9. Eingefärbte Tunnelröhre in Abhängigkeit zur Terminplanung und dem jeweiligen Einbaudatum der Segmente.

Autoren

Ihr
Autorenbe-
bild hier

Dr.-Ing. Felix Hegemann
Maidl Tunnelconsultants GmbH & Co. KG
Fuldastraße 11
47051 Duisburg
f.hegemann@maidl-tc.de

Ihr
Autorenbe-
bild hier

Dr.-Ing. Jelena Ninić
University of Nottingham
Faculty of Engineering
Dept of Civil Engineering
Nottingham NG7 2RD, UK
jelena.ninic@nottingham.ac.uk

Ihr
Autorenbe-
bild hier

Prof. Dr. techn. Günther Meschke
Ruhr-Universität Bochum
Lehrstuhl für Statik und Dynamik
Universitätsstraße 150
44780 Bochum
guenther.meschke@rub.de

Ihr
Autorenbe-
bild hier

Dr.-Ing. Janosch Stascheit
Maidl Tunnelconsultants GmbH & Co. KG
Fuldastraße 11
47051 Duisburg
j.stascheit@maidl-tc.de

Ihr
Autorenbe-
bild hier

Dr.-Ing. Ulrich Maidl
Maidl Tunnelconsultants GmbH & Co. KG
Goethestraße 74
80336 München
u.maidl@maidl-tc.de