

Building Information Modelling in mechanised shield tunnelling – A practitioner's outlook to the near future

Building Information Modelling im maschinellen Schildvortrieb – Ein praxisorientierter Blick in die nähere Zukunft

The contribution takes a glance at the application of BIM technologies in the design and construction phases of shield tunnelling projects. The intention is to show how Building Information Modelling can be translated into actual benefit, not only in the operation phase but also in the design and construction phases of bored tunnels. Emphasising the integrative character of referencing data uniformly in space and time, examples are given of seamless communication between 3D geometrical modelling, efficient numerical simulation and model adaptation based on measured data acquired during the boring process. The article covers the complete range from predesign through structural analysis and detailed design until the actual excavation process including its interactions with the environment. Special emphasis is given to data management, which is the key to transforming a mere 3D visualisation into a Building Information Model. The article therefore presents a concept for database-supported, web-based integration of software modules for geometrical modelling in various levels of detail, efficient numerical simulation tools that are based upon this representation, and process controlling that manages all data acquired during the construction process in a spatially and temporally coordinated reference system.

1 Introduction

BIM – Building Information Modelling – has already reached an indispensable position in the design and management of structures in the building industry. In tunnelling, BIM cannot yet develop its full potential, neither in the operation of tunnels nor in the design and construction phases. One explanation for this is that it is not always clear how exactly BIM should be used in tunnelling and where the added value is.

The basis for a Building Information Model is normally a three-dimensional geometrical description in various levels of detail. This provides the part of BIM that is externally visible and enables, in addition to visualisation, self-explaining navigation through the project information. Even if the 3D view is useful for the better understanding of complex building elements, the actual added value of BIM only comes with the linking of geometry and information extending through all phases of a project. If all incoming information and every measured value are successfully assigned to the corresponding geometrical descriptions from the 3D model, unambiguously refer-

Der Beitrag wirft einen praxisorientierten Blick auf den Einsatz von BIM-Technologien in der Planungs- und Bauphase von maschinell vorgetriebenen Tunnelbauwerken. Dabei wird aufgezeigt, wie sich Building Information Modelling in einen direkt nutzbaren Mehrwert nicht nur im Betrieb von Tunneln, sondern auch bei der Planung und während des Vortriebs umsetzen lässt. Den integrativen Charakter von einheitlich referenzierter Datenhaltung betonend, gibt der Artikel Beispiele für die nahtlose Kombination von 3D-Geometriemodellierung, effizienter numerischer Simulation und messdatenbasierter Modellanpassung. Dabei wird der Bogen über die Entwurfsplanung, die statische Berechnung und die Ausführungsplanung bis zum Vortrieb und dessen Interaktion mit der Umgebung geschlagen. Besonderes Augenmerk wird dabei auf das Datenmanagement gelegt, das aus einer reinen dreidimensionalen Visualisierung ein echtes Informationsmodell macht. Dazu wird ein Konzept zur datenbankgestützten und webbasierten informationellen Integration von Softwaremodulen zur geometrischen Modellierung in multiplen Detailstufen, zur darauf aufbauenden effizienten numerischen Simulation des Vortriebsprozesses und seiner Interaktionsprozesse sowie des Prozesscontrollings mit Integration aller während des Schildvortriebs anfallenden Daten in einem räumlich und zeitlich koordinierten Referenzsystem vorgestellt.

1 Einleitung

BIM – Building Information Modelling – hat im Hochbau längst einen unverzichtbaren Stellenwert in der Planung und Bewirtschaftung von Bauwerken. Im Tunnelbau kann BIM noch nicht sein ganzes Potential ausspielen, weder im Betrieb von Tunneln noch in der Planungs- und Bauphase. Das liegt auch daran, dass nicht immer klar ist, wie genau BIM im Tunnelbau angewandt wird und worin der entsprechende Mehrwert besteht.

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,

enced to time and location, then a very precise display of the intended and actual state of the project can be created at any time through intelligent data base queries and big data methods [1]. Broken down in its development with time, this then provides a transparent, holistic digital model of the tunnel construction process and of the tunnel, with which the most varied tasks can be efficiently handled.

In order to enable the exchange of these digital models between the various software producers, efforts are underway to specify a uniform data exchange format. The best known data exchange format for BIM models is the STEP-based IFC standard (Industry Foundation Classes) [2], which was originally developed for building but for which many extensions are available for the field of infrastructure. In IFC5, many of these extensions like *IfcTunnel*, *IfcBridge*, *IfcRoad* or *IfcRail* should be included in order to enable use of the IFC for infrastructure [3]. In the current approach, however, the IFC standard is not used since no models can be exchanged but only selected datasets between the BIM model and an external web application.

In the design phase, variant studies, sensitivity analyses and investigations of interruption scenarios are used for the optimisation of the alignment and the applied tunnelling process as well as for the identification of decisive loading cases for structural design and the design for construction. During the production of the design for construction, when the level of detail of the BIM is higher, geometrical information together with its assigned material properties, loading cases and construction states can be very easily transferred to the corresponding structural design model. The results of this can then be assigned back to the corresponding construction elements to supplement the holistic picture of the tunnel.

In the construction phase finally, the machine data and the recording of a wide range of further information provide yet more data sources. Also in this case, all the data can be integrated into the BIM model referenced to time and location. This can provide a continuous comparison of the intended and actual situations, enabling correction in both directions. If the construction differs from the design, then this can be rapidly detected and appropriately corrected. If the assumed conditions differ from the encountered conditions, then the basis of the model can be adapted just as rapidly and an appropriate forecast can be produced of the system behaviour that is now to be expected.

In order to optimally exploit the already described possibilities and thus the actual added value of BIM in the design and construction phases of mechanised tunnels, however, clear and simple data integration is required between all involved software modules and service providers. It should be possible for authorised project parties to carry out the data integration at any time at the touch of a button in order to avoid complex, error-prone processes. In order to ensure data integration independent of time and place, this should also be performed online at the touch of a button and automated through secure and compatible interfaces.

In the following, examples of recently developed software modules for geometrical modelling, for efficient nu-

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 Methoden des Big Data [1] jederzeit ein sehr genaues Bild vom Soll- und vom Ist-Zustand des Projekts erzeugen. In seiner zeitlichen Entwicklung aufgeschlüsselt, erhält man dann ein transparentes, ganzheitliches digitales Modell des Tunnelbauprozesses und des Tunnels, mit dem sich die unterschiedlichsten Aufgaben effizient erledigen lassen.

Für den Austausch dieser digitalen 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 dem hier vorgestellten Ansatz findet der IFC-Standard allerdings keine Anwendung, da hier keine Modelle ausgetauscht werden, sondern lediglich ausgewählte Datensätze zwischen dem BIM-Modell und einer externen Webanwendung.

In der Entwurfsphase werden Variantenstudien, Sensitivitätsanalysen und Untersuchungen von Störfallszenarien zur Optimierung der Trassierung und der eingesetzten Vortriebsverfahren sowie für die Identifikation von maßgebenden Lastfällen für die Bemessung und die Ausführungsplanung genutzt. Während der Ausführungsplanung, wenn 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 Bemessungsmodelle 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 lassen sich alle Daten räumlich und zeitlich in das BIM integrieren. 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 Datenintegrati-

merical and AI-based structural analysis and for online data recording and management during a tunnel project are described. Finally, a concept is presented how these modules can communicate with each other and thus implement the integration described above of all essential information about the tunnel project.

2 Integration of geometrical modelling and simulation

2.1 BIM-based project description in mechanised tunnelling

Complex simulation models demand a lot of project-specific information, which is typically available in scattered sources such as drawings, tables, diagrams or heterogeneous databases. Information about the tunnel geometry is usually in the form of CAD files or, ever more often, as Building Information Models (BIM), in which further relevant information from design and construction can be deposited [4] [5] [6].

One of the challenges of the optimisation of the project design is to keep the design and construction variants and the associated numerical analyses consistent through the various sub-models and over the duration of the project. Until now, this has been an error-prone process since data is often manually converted in the most varied formats. These include, for example, coordinate transformations between various reference systems or specific geometrical modelling formats from calculation tools.

One efficient solution to this problem is an integrated design analysis tool [7] [8], with which numerical simulations can be automatically generated based on their geometry and associated semantic information. The corresponding information in this case is imported directly from BIM programs like Autodesk Revit [9], Bentley MicroStation [10] and GenerativeComponents [11], Graphisoft ArchiCAD [12] and Rhino-Grasshopper-ArchiCAD Toolset [13] or Nemetschek Allplan [14]. Furthermore, a multi-scale modelling concept can be used, in which all components of a shield tunnel drive (ground, tunnelling machine, tunnel lining, building) can be efficiently modelled in varied levels of detail (LoD).

Thus for example a large-scale model of the tunnel alignment and the surrounding buildings or infrastructure can be represented on a scale of kilometres while exact modelling of a cross passage with reinforcement details can be included on a scale of centimetres. Such an integrated, multi-scale model improves the efficiency of modelling by minimising the amount of work both to create the model and for calculation. Changes, which occur during the construction process, and the recording of the actual situation during tunnelling can be played back into the overall model at any time. In addition, both parameters of the geometry sub-model and datasets linked to the individual building elements are used, transferred through suitable interfaces.

2.2 Revit models and Dynamo plugins for LoD approach

The SatBim framework [15] is a comprehensive concept for the integration of multi-scale model representations into a BIM. This concentrates particularly on the geometrical-semantic modelling of the mechanised shield drive in a form suitable for direct use in numerical simulations.

on 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.

Im folgenden werden Beispiele für kürzlich entwickelte Softwaremodule zur geometrischen Modellierung, zur effizienten numerischen und KI-basierten Strukturanalyse sowie zur Online-Datenerfassung und zum Datenmanagement während des Vortriebs erläutert. Schließlich wird ein Konzept vorgestellt, wie diese Module miteinander kommunizieren und dadurch die oben dargelegte Integration aller wesentlichen Informationen zum Tunnelprojekt realisieren.

2 Integration von Geometriemodellierung und Simulation

2.1 BIM-basierte Projektdarstellung im maschinellen Schildvortrieb

Komplexe Simulationsmodelle erfordern eine Vielzahl projektspezifischer Informationen, die üblicherweise in verstreuten Quellen wie Zeichnungen, Tabellen, Diagrammen oder heterogenen Datenbanken vorliegen. Informationen über die Tunnelgeometrie liegen klassischerweise in Form von CAD-Dateien oder, immer öfter, als Building Information Model (BIM) vor, in dem auch weitere relevante Informationen über den Entwurf und die Bauausführung abgelegt werden können [4] [5] [6].

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 [7] [8], 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 [9], Bentley MicroStation [10] und GenerativeComponents [11], Graphisoft ArchiCAD [12] und Rhino-Grasshopper-ArchiCAD Toolset [13] oder Nemetschek Allplan [14] entnommen. Darüber hinaus lässt sich ein mehrskaliges Modellierungskonzept einsetzen, bei dem alle Komponenten des Schildvortriebs (Baugrund, Vortriebsmaschine, Tunnelschale, Gebäude) effizient mit variablen Detaillierungsgraden (LoD – level of detail) modelliert werden können.

Dadurch kann beispielsweise auf der Kilometerskala ein grobskaliges Modell für die Tunneltrasse und die umgebenden Gebäude oder Infrastruktur gebildet werden, während auf einer Zentimeterebene alle Details für die exakte Modellierung eines Querschlags mit Bewehrungsführung einbezogen werden können. Solch ein integrier-

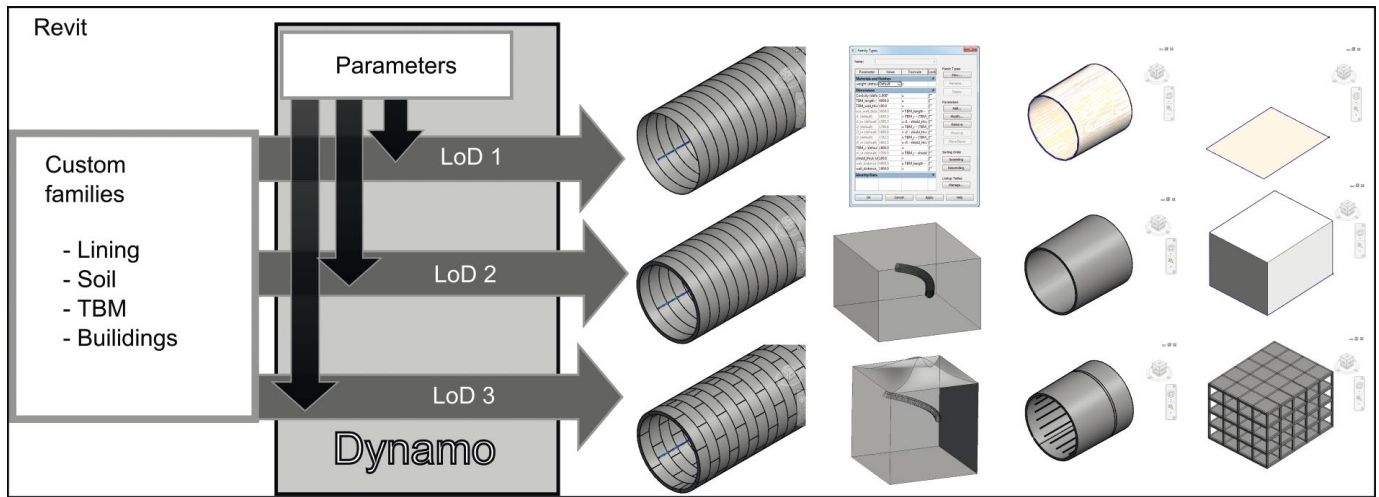


Fig. 1. Multilevel representation of geometry: generation of model components on different LoDs and parameter consistency between different LoDs for individual components

Bild 1. Mehrstufige Geometrierepräsentation: Generierung von Modellkomponenten in unterschiedlichen Detaillierungsgraden (LoD) und konsistenter Parameter zwischen unterschiedlichen LoDs für die jeweiligen Komponenten

In addition, a realistic simulation model has been developed for mechanised shield tunnelling, which can be used both in the design phase and in the construction phase and represents all significant components, specifically the ground, the segmental tunnel lining, support measures at the face and in the annular gap, the tunnel boring machine with the thrust presses, and any buildings and infrastructure in the neighbourhood of the tunnel.

For each model component, three LoDs are defined: low (LoD 1), medium (LoD 2) and high (LoD 3). The lowest LoD is a non-volumetric representation of the components, in which for example buildings are only represented by the ground area and the tunnel lining and the tunnel boring machine are only represented by surfaces. In LoD 2, a volumetric model is created for the components, which corresponds to the actual spatial extent but with simplified geometry. Semantic information like process parameters are also represented in various LoDs, with the necessary spatial and temporal resolution or the necessity of time-dependent effects being considered in the simulation.

In order to ensure the consistency of the model with the use of various levels of detail, all components are defined by hierarchical parameter sets. For lower LoDs, just one part quantity of the corresponding parameter set is used, while for the highest LoDs all included parameters are used. Examples of various LoDs for selected components can be seen in Figure 1. The technical implementation uses Dynamo plugins [8] [16]. Combination of the objects of all individual components in their relevant levels of detail produces the complete tunnel information model (TIM) [6].

3 Efficient numerical simulation during tunnelling

The concept for simulation- and monitoring-based forecasting of tunnelling parameters in the course of a tunnel drive includes three phases:

- Production of surrogate model (in advance),

tes, 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.

2.2 Revit-Modelle und Dynamo-Plugins für LoD-Ansatz

Mit dem SatBim-Framework [15] wurde ein umfassendes Konzept zur Einbindung mehrskaliger Modellrepräsentationen in ein BIM 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, das 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 nichtvolumetrische 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, das der tatsächlichen räumlichen Ausdehnung, jedoch mit einer vereinfachten Geometrie entspricht. LoD 3 enthält schließlich genauere Details der tatsächlichen Geometrie. Auch

- Monitoring-based updating of surrogate model (during process),
- Process parameter forecast (looking ahead).

In the first phase before the start of tunnelling works, a numerically efficient surrogate model is generated. The input data are material, geometrical and process parameters. The output data are the control target figures, e.g. settlements, section forces and moments or ground deformations. For the material, geometrical and process parameters, the areas to be investigated are decided from the available project data.

In the second phase, the surrogate model is validated during construction with measured data (from surveying or machine data recording). The material and geometrical parameters obtained from the project data and the process parameters actually selected in the first tunnelling steps are used as input data. If the control target figures (e.g. settlements at selected survey points) computed with the surrogate model are within a tolerance range to be defined for the measured figures, then the surrogate model can be used without modification for the forecasting of tunnelling parameters. Otherwise the surrogate model is updated, for example by newly identifying some material and geometrical parameters of the ground strata using the monitoring data.

The updated material and geometrical parameters are used in the third phase to forecast control target figures (e.g. future settlements). In order to minimise settlements or maintain permissible settlements, optimisation tasks can be formulated. The forecast process parameters (e.g. support and grouting pressures) can in practice be shown to the machine driver in order to support his control decisions.

3.1 Meta models

During the tunnel drive, decisions normally have to be made very quickly. In this case, it is necessary to produce calculation results almost in real time in order to use them practically for decision making. In addition, analytical or empirical calculation processes can be used, which however entail a high degree of simplification and a range of assumptions. Complex three-dimensional numerical simulations, on the other hand, make it possible to record all structure-ground interactions and ground reactions precipitated by the tunnelling process. This is however associated with a large amount of computing and thus takes time. This disadvantage can be ameliorated through the use of efficient meta models instead of the original laborious numerical models.

Meta models were originally developed as surrogate models for numerically laborious simulation processes in order to reduce the overall computing time. In recent years, they have been used as a solution for a range of practical engineering tasks, frequently for example for forecasting, sensitivity analyses, pattern recognition or for optimisation. In tunnelling, meta models have been developed, which are trained with settlements measured during the tunnel drive [17] [18]. Others are trained on complex simulation models [19] [20] [21] and for the forecasting of settlements during tunnelling.

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.

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 Bild 1 zu sehen. Die technische Umsetzung erfolgt mittels Dynamo-Plugins [8] [16]. Durch Kombination der Objekte aller individuellen Komponenten in ihren jeweiligen Detaillierungsgraden entsteht das vollständige Tunnelinformationsmodell (TIM) [6].

3 Effiziente vortriebsbegleitende numerische Simulation

Das Konzept zur simulations- und monitoringbasierten Prognose von Vortriebsparametern im Zuge des Tunnelvortriebs beinhaltet drei Phasen:

- Ersatzmodellerstellung (vorab),
- Monitoringbasiertes Ersatzmodellupdate (prozessbegleitend),
- Prozessparameterprognose (vorausschauend).

In der ersten Phase wird vor Beginn der Vortriebsarbeiten ein numerisch effizientes Ersatzmodell generiert. Eingabedaten sind Material-, Geometrie- und Prozessparameter. Ausgabedaten sind die Steuerzielgrößen, z. B. Setzungen, Schnittgrößen oder Baugrundverformungen. Für die Material-, Geometrie- und Prozessparameter werden zu untersuchende Bereiche aus den vorhandenen Projektdaten festgelegt.

In der zweiten Phase wird das Ersatzmodell mit gemessenen Daten (aus der Vermessung oder aus der Maschinendatenerfassung) baubegleitend validiert. Die aus den Projektdaten erlangten Material- und Geometrieparameter und die tatsächlich in den ersten Vortriebsschritten gewählten Prozessparameter werden als Eingabedaten verwendet. Liegen die mit dem Ersatzmodell berechneten Steuerzielgrößen (z. B. Setzungen an ausgewählten Messpunkten) innerhalb eines zu definierenden Toleranzbereichs der gemessenen Größen, kann das Ersatzmodell ohne Modifikation für die Prognose von Vortriebsparametern eingesetzt werden. Anderenfalls wird das Ersatzmodell aktualisiert, indem z. B. einige Material- und Geometrieparameter der Bodenschichten unter Nutzung der Monitoringdaten mithilfe von Optimierungsverfahren neu identifiziert werden.

Die aktualisierten Material- und Geometrieparameter werden in der dritten Phase genutzt, um Steuerzielgrößen (z. B. zukünftige Setzungen) zu prognostizieren. Für die Minimierung von Setzungen oder für die Einhaltung zulässiger Setzungen können Optimierungsaufgaben formuliert werden. Die prognostizierten Prozessparameter (z. B. Stütz- und Verpressdrücke) könnten in der Praxis dem Maschinenführer angezeigt werden, um seine Steuerentscheidung zu unterstützen.

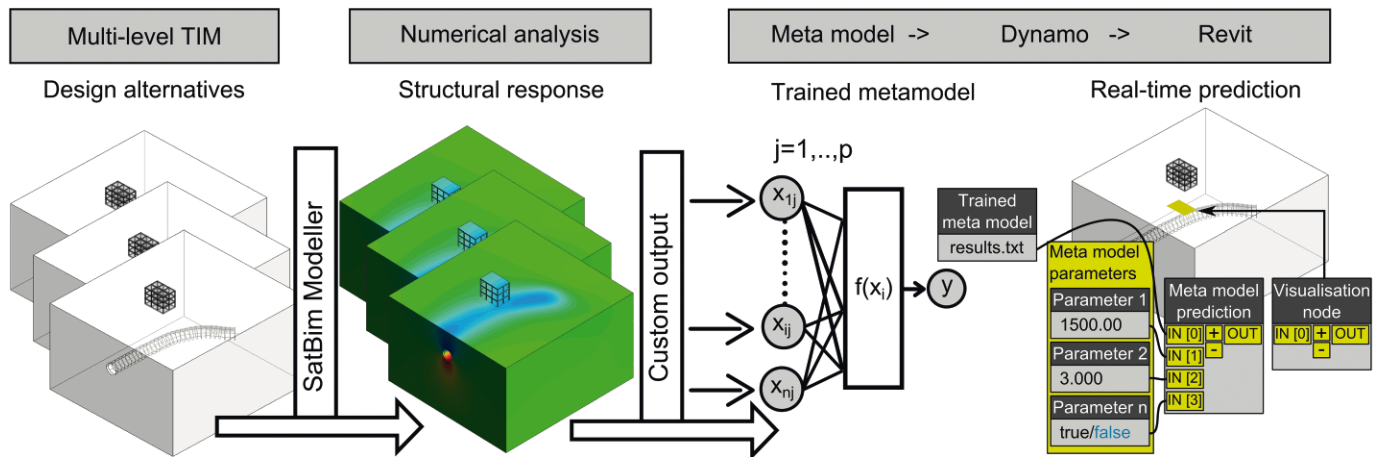


Fig. 2. Scheme of the real-time prediction of the tunnelling induced effects
Bild 2. Schema der Echtzeitprognose von vortriebsinduzierten Effekten

Meta models are compact representations of data or simulation models, with which the dependencies between input data x and output data y , which describe a certain problem, can be represented using a learning process. This process can generally be expressed in the form $y = f(x)$. Various mechanised learning algorithms are used for the determination of $f(x)$, including for example polynomial ansatz, Support Vector Regression (SVR), Artificial Neural Networks (KNN), Recurrent Neural Networks (RNN) or Proper Orthogonal Decomposition (POD). The processes mentioned here are described in detail in [20, 21].

3.2 Simulation-based surrogate models

In the course of the research work described here, meta models were trained with a large number of simulation runs, which could be performed in the design phase of a project. These are based on the design data for the project with the objective of numerical analysis and the important parameters, which are identified in a sensitivity analysis [22]. The already described SatBim framework was used in order to efficiently create the large number of simulation models with the required design variants (Figure 2).

The simulation results are then used for a selected group of parameters to train a meta model with the learning algorithm mentioned above. Out of the currently available models, that with the best forecasting capability is selected, i.e. the model that shows the least errors on validation with the validation dataset: This guarantees the robustness of the meta model used. Thereafter the selected meta model can be used in its corresponding application limits as a complete replacement for the simulation model.

The real time capability of the forecast of highly dimensional result quantities is achieved through the combination of Recurrent Neural Networks (RNN) with the Gappy Proper Orthogonal Decomposition (GPOD) method [23]. With this procedure, which has been specially developed for mechanised tunnelling, RNN equivalent models are used for the forecasting of time-variant settlements at individual monitoring points and the entire settlement field is approximated with the GPOD.

This hybrid RNN-GPOD surrogate model was verified in [21] using analytical solutions and used for safety

3.1 Metamodelle

Während des Vortriebs müssen Entscheidungen üblicherweise sehr schnell getroffen werden. In diesem Fall ist es notwendig, Berechnungsergebnisse nahezu in Echtzeit zu produzieren, um diese sinnvoll für die Entscheidungsfindung einzusetzen. Dazu können analytische oder empirische Berechnungsverfahren zum Einsatz kommen, die jedoch ein hohes Maß an Vereinfachungen und eine Reihe von Annahmen aufweisen. Komplexe dreidimensionale numerische Simulationen ermöglichen es hingegen, alle Bauwerks-Boden-Interaktionen und die durch den Vortriebsprozess ausgelösten Baugrundreaktionen zu erfassen. Sie sind jedoch mit hohem numerischem und damit zeitlichem Aufwand verbunden. Durch den Einsatz von effizienten Metamodellen anstelle der ursprünglichen aufwendigen numerischen Modelle kann dieser Nachteil aufgewogen werden.

Metamodelle wurden ursprünglich als Ersatzmodelle für numerisch aufwendige Simulationsprozesse entwickelt, um den Rechenaufwand insgesamt zu verringern. In den vergangenen Jahren wurden sie zur Lösung einer Reihe von praktischen Ingenieuraufgaben eingesetzt, häufig zum Beispiel für Prognosen, Sensitivitätsanalysen, zur Mustererkennung oder in der Optimierung. Im Tunnelbau wurden Metamodelle entwickelt, die mit während des Tunnelvortriebs gemessenen Setzungen trainiert wurden [17] [18]. Andere wurden auf komplexe Simulationsmodelle trainiert [19] [20] [21] und zur Prognose von Setzungen während des Vortriebs eingesetzt.

Metamodelle sind kompakte Representationen von Daten oder Simulationsmodellen, bei denen die Abhängigkeiten zwischen Eingabedaten x und Ausgabedaten y , die ein bestimmtes Problem beschreiben, mithilfe eines Lernprozesses nachgebildet werden. Dieser Prozess kann generell in der Form $y = f(x)$ ausgedrückt werden. Zur Bestimmung von $f(x)$ kommen dabei verschiedene maschinelle Lernalgorithmen zum Einsatz, darunter beispielsweise Polynomansätze, Stützvektor-Regression (SVR), künstliche neuronale Netze (KNN), Rekurrente neuronale Netze (RNN) oder Proper Orthogonal Decomposition (POD). Die hier aufgeführten Verfahren werden im Detail in [20, 21] beschrieben.

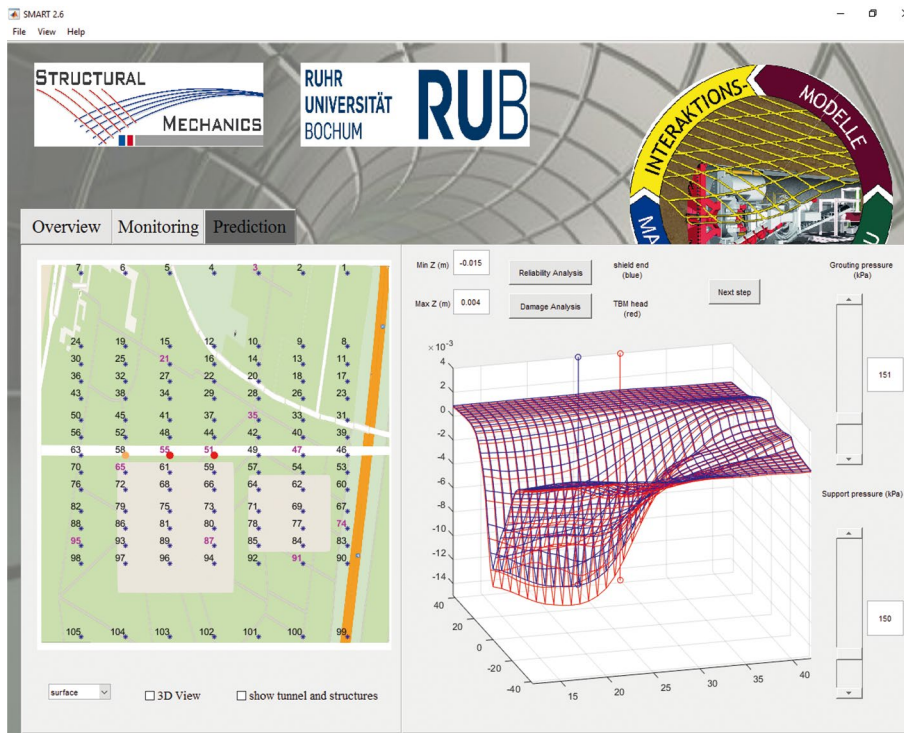


Fig. 3. Computed field of settlement intervals in the prognosis module of the SMART application
Bild 3. Berechnetes Intervallsetzungsfeld im Prognosemodul der SMART-Applikation

analyses of mechanised tunnelling processes, with the effects of various fuzzy models for the ground and process parameters (stochastic quantities, intervals, stochastic quantities with interval distribution parameters) on the computed settlement fields and the corresponding probabilities of permissible settlements being exceeded also being investigated.

In tunnelling practice, the assumption of intervals of a few geotechnical parameters is sensible in order to represent the effects of uncertain ground properties on the result quantities (e.g. settlement troughs). When interval ground parameters are assumed, two optimisation tasks (min. and max.) have to be solved for the calculation of the interval limits in each time step for each displacement component of the settlement field. Despite the numerically very efficient RNN-GPOD surrogate model, this takes several minutes. More advantageous is direct calculation of the entire interval settlement field through the integration of the interval analysis in the hybrid RNN-GPOD surrogate model [24]. With this procedure, the computing time is reduced from the original 90 min to 4 s, i.e. by changing the relevant tunnelling parameters (thrust pressure and support pressure) for the limitation of settlement, the entire interval settlement field is computed in 4 s. In order to test this innovative model, the application SMART (Simulation-and-Monitoring-based Assistant for Real-time steering in mechanised Tunneling) is being developed in SFB 837 at the Ruhr-University, Bochum (Figure 3).

3.3 Visualisation of the simulation results in the 3D model

The visualisation of the raw data from numerical simulations (e.g. displacements at each node or stresses at each integration point of the model) is not always the most efficient method of understanding and interpreting the calculated results and drawing conclusions about the system

3.2 Simulationsbasierte Ersatzmodelle

Im Rahmen der hier vorgestellten Forschungsarbeiten wurden Metamodelle mit einer großen Anzahl von Simulationsläufen trainiert, die in der Designphase eines Projekts durchgeführt werden könnten. Diese basieren auf den Entwurfsdaten für das Projekt, dem Ziel der numerischen Analyse und den wichtigen Parametern, die in einer Sensitivitätsanalyse erkannt wurden [22]. Das zuvor vorgestellte SatBim-Framework wurde dabei verwendet, um die große Zahl von Simulationsmodellen mit den erforderlichen Entwurfsvarianten effizient zu erzeugen (Bild 2).

Die Simulationsergebnisse werden dann für eine ausgewählte Gruppe von Parametern zum Anlernen eines Metamodells mit den oben genannten Lernalgorithmen verwendet. Aus den nun verfügbaren Modellen wird dasjenige mit den besten Prognosefähigkeiten ausgewählt, d.h. das Modell, das den geringsten Fehler bei der Validierung mit dem Validierungsdatensatz aufweist. Dies garantiert die Robustheit des verwendeten Metamodells. Danach kann das ausgewählte Metamodell in seinen entsprechenden Anwendungsgrenzen als vollständiger Ersatz für das Simulationsmodell verwendet werden.

Die Echtzeitfähigkeit für die Prognose hochdimensionaler Ergebnisgrößen wird durch die Kombination rekurrenter neuronaler Netze (RNN) mit der Gappy Proper Orthogonal Decomposition (GPOD)-Methode erreicht [23]. Bei dieser speziell für den maschinellen Tunnelbau neu entwickelten Vorgehensweise werden RNN-Ersatzmodelle für die Prognose der zeitvarianten Setzungen an einzelnen Monitoringpunkten eingesetzt und das gesamte Setzungsfeld mit der GPOD approximiert.

Dieses hybride RNN-GPOD Ersatzmodell wurde in [21] anhand analytischer Lösungen verifiziert und für Sicherheitsanalysen maschineller Tunnelvortriebsprozesse angewendet. Dabei wurden auch die Auswirkungen verschiedener Unschärfemodelle für die Boden- und Pro-

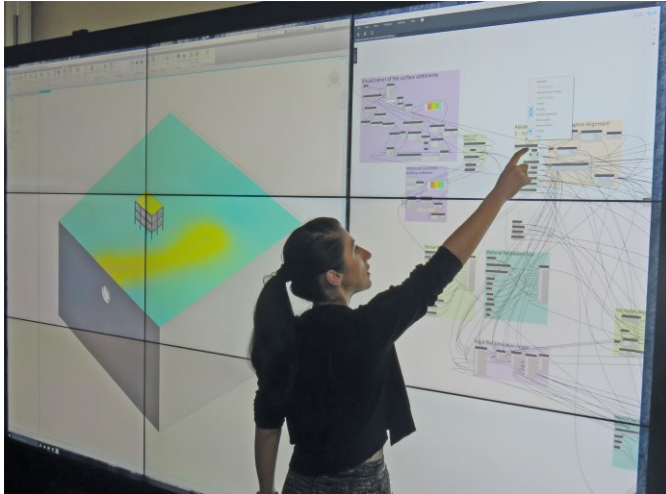


Fig. 4. Visualisation of simulation results and real-time assessment of the design alternatives on a multi-touch video wall [13]

Bild 4. Visualisierung von Simulationsergebnissen und Echtzeitbewertung von Entwurfsalternativen mit einer Multi-Touch-Videowand [13]

behaviour. The results are often too numerous and confusing for this purpose.

Therefore in SatBim, the simulation results are evaluated with a user-defined algorithm in Dynamo [16] and then visualised. This enables a comprehensive, intuitive and understandable view of the results by the user, making it possible for the effects of control or construction decisions on the safety and performance of a tunnel drive to be rapidly evaluated. In case the displayed results come from efficient surrogate or meta models, which replace numerically laborious simulation models for the corresponding parameter range, the visualisation of the results can even be used for real time forecasts and tunnelling optimisation. An example for the visualisation methods described here is shown in Figure 4.

4 Recording of tunnelling data

4.1 Principle of process controlling

In order to be able to ensure an efficient and safe tunnel drive, monitoring of process data is absolutely essential. Tunnel boring machines are equipped with numerous sensors, whose measured values are automatically recorded, continuously or at short intervals. In addition to the automatically recorded data, there are a large number of external, heterogeneous data sources for the recording of geotechnical data, maintenance works or shift reports, which are closely associated with the tunnel drive (Figure 5).

The resulting flood of data can only be used for the monitoring and optimisation of the tunnel drive, so-called process controlling, if their semantics take into account the location in space and time and if they are clearly and understandably processed by an evaluation program [25]. Furthermore, the data is seldom evaluated where it is produced. A data storage medium is therefore required, in which the tunnelling data can be centrally stored in an unambiguous spatial and temporal coordinate system and made available worldwide in real time over networks. For

zessparameter (stochastische Größen, Intervalle, stochastische Größen mit Intervall-Verteilungsparametern) auf die berechneten Setzungsfelder und die entsprechenden Wahrscheinlichkeiten des Überschreitens zulässiger Setzungen untersucht.

In der Tunnelbaupraxis ist die Annahme von Intervallen einiger geotechnischer Parameter zielführend, um die Auswirkungen der unscharfen Baugrundeigenschaften auf die Ergebnisgrößen (z.B. Setzungsmulden) abzubilden. Bei Annahme von Intervallbodenparametern müssen in jedem Zeitschritt für jede Verschiebungskomponente des Setzungsfelds zwei Optimierungsaufgaben (min. und max.) zur Berechnung der Intervallgrenzen gelöst werden. Dies dauert trotz des numerisch sehr effizienten RNN-GPOD Ersatzmodells mehrere Minuten. Vorteilhafter ist die direkte Berechnung des gesamten Intervallsetzungsfelds durch die Integration der Intervallanalyse in das hybride RNN-GPOD Ersatzmodell [24]. Mit dieser Vorgehensweise wird die Rechenzeit von ursprünglich 90 min auf 4 s reduziert, d.h. bei Änderung der zur Begrenzung der Setzungen relevanten Vortriebsparameter (Verpress- und Stützdruck) wird innerhalb von 4 s das gesamte Intervallsetzungsfeld berechnet und visualisiert. Um diese neuartige Methode zu erproben, wird im SFB 837 der Ruhr-Universität Bochum die Applikation SMART (Simulation-and-Monitoring-based Assistant for Real-time steering in mechanized Tunneling) entwickelt (Bild 3).

3.3 Visualisierung von Simulationsergebnissen im 3D-Modell

Die Visualisierung der Rohdaten aus numerischen Simulationen (z.B. Verschiebungen in jedem Knoten oder Spannungen in jedem Integrationspunkt des Modells) ist nicht immer die effizienteste Methode, um die Berechnungsergebnisse zu verstehen, zu interpretieren und Rückschlüsse auf das Systemverhalten zu ziehen. Dazu sind die Ergebnisse oft zu zahlreich und zu unübersichtlich.

Daher werden in SatBim die Simulationsergebnisse über einen benutzerdefinierten Algorithmus in Dynamo [16] 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. Falls die dargestellten Ergebnisse aus effizienten Ersatz- oder Metamodellen kommen, die für den entsprechenden Parameterbereich die numerisch aufwendigen Simulationsmodelle ersetzen, kann die Ergebnisvisualisierung sogar für Echtzeitprognosen und Vortriebsoptimierung eingesetzt werden. Ein Beispiel für die hier vorgestellten Visualisierungsmethoden findet sich in Bild 4.

4 Erfassung von Vortriebsdaten

4.1 Prinzip des 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. Zusätz-

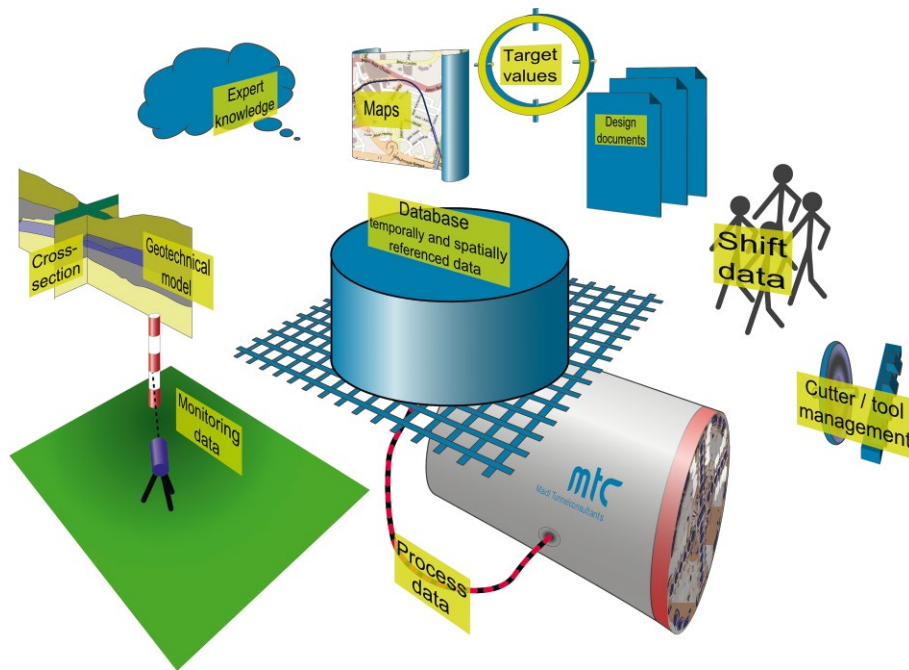


Fig. 5. Data sources in process controlling [23]
Bild 5. Datenquellen im Prozesscontrolling [23]

this purpose, web-based access over a client-server architecture is suitable, ensuring data security, data integrity and maintenance capability as well as universal access.

The challenge of such a system of process controlling is thus above all to link data from various sources with each other referenced in time and location in order to finally gain from their structure and their correlation insights about the safety, productivity and efficiency of the tunnel drive [25]. Knowing the location and time of an event is the key to understanding the data from the relevant process. Based on this common reference, plenty of additional information like documents, sensor data, intended values and expert knowledge can be assigned to the project. The analysis of the data can be very versatile. Past data can be evaluated to analyse problems or the tunnel boring machine can be monitored in real time with corresponding real time analyses running simultaneously.

Finally, such a process controlling system already represents a BIM in the wider sense, since it links semantic information with a geometrical model of the tunnel, in this case reduced to the tunnel alignment.

4.2 Process controlling as a web application

In order to implement a central system with worldwide access, a web application is needed, which can be accessed over the Internet from anywhere. The web application runs on a web server, which can be protected against unauthorised access by a SSL certificate and user accounts. Tunnelling data is protected against unauthorised access by encrypted communication. The data is stored in one or depending on the application several databases, which the web application can access (Figure 6a).

Flexible access to the data is important in order to provide the data to various programs and also users for analysis and calculation, at any time from anywhere. Another advantage of a web application is the variety of interfaces, which it can provide for the various data queries. The user does not need to install any new programs

lich zu den automatisch erfassten Daten gibt es eine große Anzahl von externen, heterogenen Datenquellen zur Erfassung geotechnischer Daten, Wartungsarbeiten oder Schichtberichte, die eng mit dem Vortriebsprozess verbunden sind (Bild 5).

Die anfallende Datenflut kann nur dann für die Überwachung und Optimierung des Vortriebs, das sog. Prozesscontrolling, herangezogen werden, wenn ihre Semantik sowie die örtliche und zeitliche Verortung berücksichtigt und von einer Auswertungssoftware übersichtlich und verständlich aufbereitet werden [25]. Darüber hinaus findet die Auswertung der Daten selten dort statt, wo sie anfallen. Es wird folglich ein Datenspeicher benötigt, in dem die Vortriebsdaten in einem eindeutigen räumlichen und zeitlichen Koordinatensystem zentral abgelegt und über Netzwerke weltweit in Echtzeit bereitgestellt werden. Dazu bietet sich ein webbasierter Zugriff über eine Client-Server Architektur an, welche die Datensicherheit, Datenintegrität, Wartungsmöglichkeiten sowie universellen Zugriff gewährleistet.

Die Herausforderung an ein solches System für das Prozesscontrolling besteht also vor allem darin, Daten aus verschiedenen Quellen zeitlich und räumlich miteinander zu verknüpfen, um schließlich aus deren Struktur und ihren Korrelationen Einsichten über die Sicherheit, Produktivität und Effizienz des Tunnelvortriebs zu gewinnen [25]. Das Wissen über Ort und Zeitpunkt eines Ereignisses sind dabei der Schlüssel zum Verständnis der Daten des jeweiligen Prozesses. Basierend auf dieser gemeinsamen Referenz können vielfältige zusätzliche Informationen wie Dokumente, Sensordaten, Zielwerte und Expertenwissen dem Projekt zugeordnet werden. Die Analyse der Daten kann hierbei sehr vielfältig sein. Es können vergangene Daten 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

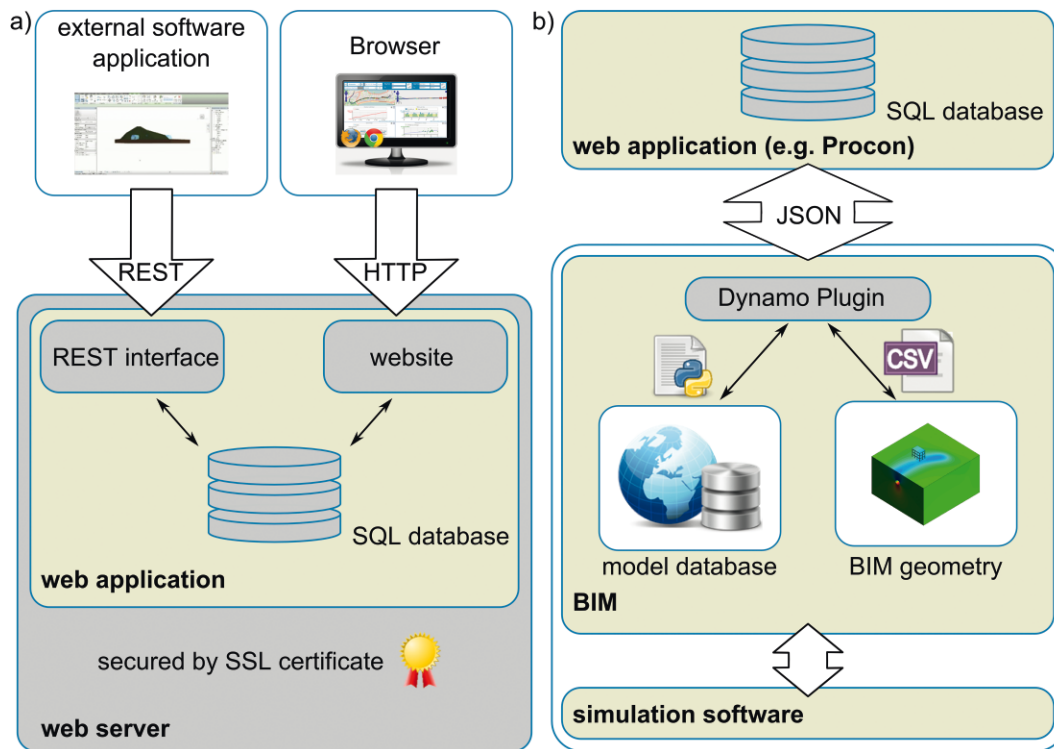


Fig. 6. a) Architecture of the process controlling web application; b) Communication scheme of the integration of project data acquisition and BIM based project representation

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

and can call up the various final data from anywhere. Software applications, which need data from calculations or evaluations, cannot normally independently download data from a website. These access so-called REST (Representational State Transfer) interfaces from integrated web services of the web application. REST is a standard for the implementation of web services, with the focus being on communication between machine and machine. Using a REST query, data can be read, created or deleted. External software programmes can thus use the implemented REST structure to extract tunnelling data, perform its analysis and calculation and then write back the results.

5 Integration concept

The aspects of BIM in tunnelling have described so far how BIM can already be implemented today in the design phase and during the tunnel drive. For the near future, it is therefore the logical consequence to couple existing programs to each other and thus reflect the basic idea of BIM that all information about a project is integrated in a common data concept so it can be used synergetically.

The production and processing of BIM projects is normally undertaken with software tools. Updating of the model can be undertaken either manually or with plugins. These are interfaces, in which certain activities are defined with parameters in order to carry them out at the click of a mouse. In the already described SatBim framework, this is implemented in Revit in combination with Dynamo plugins.

reduzierten, geometrischen Modell des Tunnels verknüpft werden.

4.2 Prozesscontrolling als Webapplikation

Zur Implementierung eines zentralen, weltweit erreichbaren Systems wird eine Webapplikation benötigt, auf die via Internet von jedem Ort aus zugegriffen werden kann. Die Webapplikation läuft dabei auf einem Webserver, der durch ein SSL-Zertifikat und Benutzerkonten gegen unbefugten Zugriff geschützt werden kann. Durch verschlüsselte Kommunikation sind die Vortriebsdaten und deren Auswertung so vor unbefugtem Zugriff geschützt. Die Daten sind in einer oder, je nach Anwendung, mehreren Datenbanken gespeichert, auf welche die Webapplikation zugreifen kann (Bild 6a).

Ein flexibler Zugriff auf die Daten ist wichtig, um sowohl unterschiedlicher Software als auch Benutzern die Daten jederzeit 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. Benutzer greifen mittels Webseiten auf die Daten zu. Der Benutzer braucht dabei keine neue Software zu installieren und kann überall von verschiedenen Endgeräten Daten abrufen. Softwareapplikationen, die Daten für Berechnungen oder Auswertungen benötigen, können sich in der Regel nicht eigenständig Daten über eine Webseite herunterladen. Diese greifen auf sogenannte REST-Schnittstellen (Representational State Transfer) von integrierten Webservices der Webapplikation zurück. REST

Plugins offer the capability of automatically integrating data from external sources into the model. They are designed and implemented specifically for the provision of interfaces. Bidirectional communication between a BIM modelling program and an external web application for simulation and process controlling can be implemented with plugins. JSON (JavaScript Object Notation) [26] is often used for this purpose, a compact data format, which is a standard for the exchange of data between web applications.

In such a plugin, specific REST queries are formulated, which are suitable for the corresponding interface of the web application. This makes it possible both to transfer information to the web application and to call up data. For example, the BIM can query the actual excavation and ring installation geometry from the web application and thus display the current situation in the model. On the other side, the BIM modelling software writes intended data after an update into the web application in order to be performed immediate intended-actual comparisons there.

5.1 Transfer of the geometrical properties into the simulation model

Integration of the tunnel information model with the simulation environment is implemented with a Dynamo plugin. Using this plugin, the model is exported in a format that enables automated production of a simulation model. For this purpose, geometrical data is exported as ACIS files (volumes, areas, lines and points), while component-specific parameters and semantic information are exchanged in the form of text files in a key-value format.

For the generic exchange of information between programs over the internet, web services are suitable, which communicate with each other over suitable interfaces, for example with JSON objects. This approach also forms the technical basis for the integration concept presented here.

For each tunnel component, a numerical model is created with the corresponding LoD. The geometry and material properties, and the constraints and interfaces to other components are included and integrated into the construction process. The fully automatic SatBim modeller enables the automatic creation and initialisation as well as the running of a numerical simulation. After the completion of the simulation, the calculation results are returned and visualised there (Figure 7).

5.2 Communication between BIM and process controlling

Figure 6b shows the general structure of the communication between a BIM program and a web application for process controlling. Data is exchanged through REST interfaces, with information being transmitted using JSON. The plugin can interpret this format and derive further steps from it such as, for example, the creation and updating of a CSV file, which serves as the input for the tunnel alignment in the model. Alternatively, the model database of the modelling software can also be updated by script in order to adapt the properties of objects in the BIM.

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.

5 Integrationskonzept

Die bisher 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.

Die Erstellung und Bearbeitung von BIM-Projekten wird in der Regel mit Softwarewerkzeugen realisiert. Aktualisierungen des Modells werden dabei entweder manuell oder durch Plugins vorgenommen. Dies sind Schnittstellen, mit denen bestimmte Abläufe parametrisiert definiert werden, um diese dann per Mausklick auszuführen. Im zuvor vorgestellten SatBim-Framework wird dies in Revit in Verbindung mit Dynamo-Plugins gelöst.

Plugins bieten die Möglichkeit, Daten aus externen Quellen automatisiert in das Modell zu integrieren. Sie 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 Plugins realisiert werden. Dazu wird oft JSON (JavaScript Object Notation) [26] eingesetzt, ein kompaktes Datenformat, das standardmäßig für den Austausch von Daten zwischen Webanwendungen verwendet wird.

In einem solchen Plugin werden spezifische REST-Anfragen formuliert, 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.

5.1 Übertragung der Geometrieeigenschaften in das Simulationsmodell

Die Integration des Tunnelinformationsmodells mit der Simulationsumgebung wird mit einem Dynamo-Plugin realisiert. Mithilfe des Plugins wird das Modell in ein Format exportiert, das die automatisierte Erzeugung eines Simulationsmodells ermöglicht. Dazu werden die Geometrieinformationen als ACIS-Dateien (Volumina, Flächen,

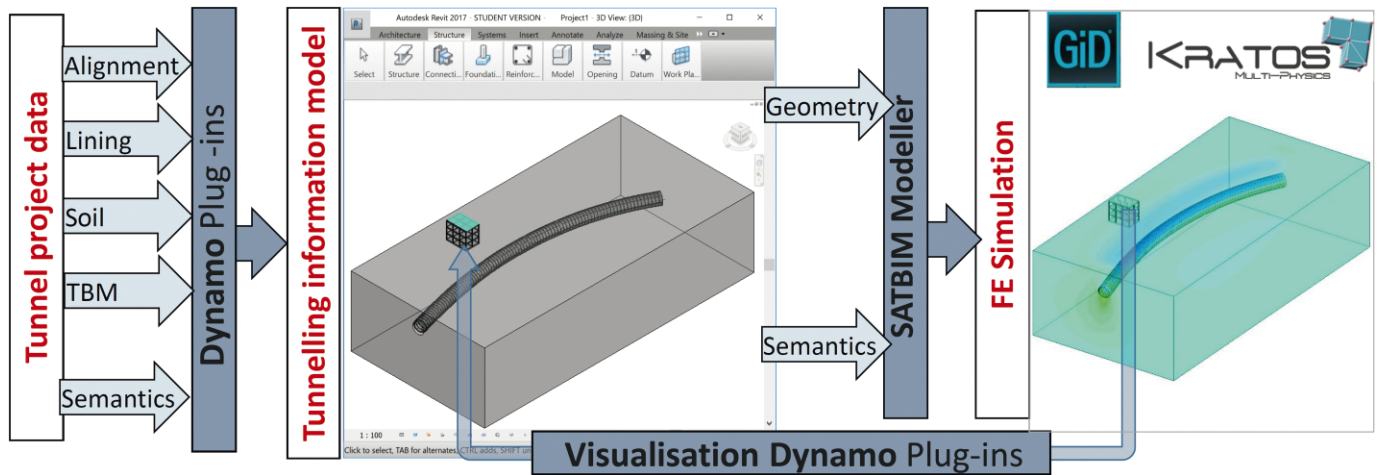


Fig. 7. Workflow and implementation of the SatBim framework: model generation and visualisation of simulation results in Revit

Bild 7. Workflow und Implementierung des SatBim-Frameworks: Erzeugung des Simulationsmodells und Ergebnisvisualisierung in Revit

6 Example scenarios

In order to illustrate the concept, a small example is described in the following with the Dynamo plugin from Autodesk Revit as the modelling software and the web application Procon [25] for the process controlling. In order to implement plugins, Dynamo has a graphical programming environment, where the user can implement certain functions and tasks graphically and create Python scripts for detailed problems. With these scripts, it is possible to implement REST queries and process the replies. Procon provides an application programming interface (API) for these queries, with certain parameters being handed over in the generated URL in order to parameterise the data query. Dynamo can process the reply to the data query in various ways, for example there is a prepared JSON interpreter. In special cases, a Python script can perform the required operations.

6.1 Simple example scenarios

In the simplest case, communication takes place between two sub-modules of the integrated model. One example for this is updating of the actually constructed tunnel alignment for comparison with the planned tunnel location. For this purpose, navigation and ring installation data can be read out of the process controlling system with a suitable API and then imported through a suitable Dynamo plugin in Revit, where the modelled tunnel alignment (design data) is represented. There for example deviation from the design alignment can be visualised by colouring the modelled tunnel according to the degree of deviation in Revit using the Dynamo plugin or even by creating an additional tunnel tube based on the actual data and superimposing this with the design tunnel alignment. Furthermore, any correction curve can be computed and returned to the process controlling system as the intended alignment.

Another example is the numerical determination of permanent axial forces from the thrust forces. These can-

Linien und Punkte) exportiert, während die komponentenspezifischen Parameter und semantische 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 Web Services, die über geeignete Schnittstellen, beispielsweise über JSON-Objekte, miteinander kommunizieren. Dieser Ansatz bildet auch die technische Grundlage für das hier vorgestellte Integrationskonzept.

Für jede Tunnelkomponente wird ein numerisches Modell für den entsprechenden LoD erzeugt. Dabei werden die Geometrie und die Materialeigenschaften sowie die Randbedingungen und Schnittstellen zu anderen Komponenten berücksichtigt und in den Bauprozess eingebunden. Der vollautomatische 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 (Bild 7).

5.2 Kommunikation zwischen BIM und Prozesscontrolling

Bild 6b zeigt den generellen Aufbau zur Kommunikation zwischen einer BIM-Software und einer Webapplikation zum Prozesscontrolling. Der Austausch der Daten findet über REST-Schnittstellen statt, wobei Informationen mittels JSON übertragen werden. Das Plugin kann dieses Format interpretieren und hieraus weitere Schritte ableiten wie beispielsweise das Erstellen bzw. Aktualisieren einer CSV Datei, die als Input für die Tunneltrasse im Modell dient. Alternativ kann auch die Modelldatenbank der Modellierungssoftware mittels Skript aktualisiert werden, um die Eigenschaften von Objekten im BIM anzupassen.

6 Beispielszenarien

Zur Verdeutlichung des Konzepts wird im Folgenden ein kleines Beispiel vorgestellt mit dem Dynamo-Plugin von

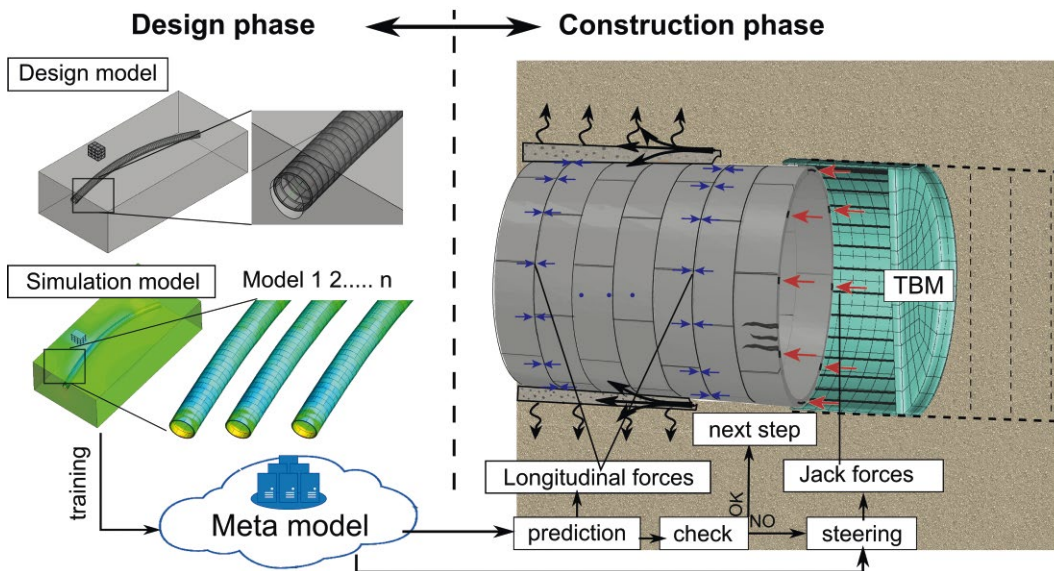


Fig. 8. Determination of permanent axial forces from machine data recordings
Bild 8. Ermittlung bleibender Längskräfte aus Maschinendatenaufzeichnungen

not be directly measured but represent valuable information for the estimation of the water tightness and stiffness of the tunnel tube in the longitudinal direction. With suitable numerical models, the permanent axial forces can be determined from the loading history. For this purpose the recorded data is transmitted to a previously attached meta model, which then calculates the corresponding permanent forces (Figure 8). A similar model without direct connection to the process controlling was used, for example, in [27].

6.2 Example scenario with model update

A more complex example is sketched in Figure 9, where the meta model updated as the tunnel advanced is connected with the process controlling system, and parameter identification and optimisation strategies are applied to numerical models. First a meta model is created using the modelling function of the SatBim framework. The tunnelling and monitoring data recorded in the process controlling system are used in the second step to adapt the model parameters so that the model results reproduce the measured control values (in this case the settlement measurements). In the third step, the tunnelling parameters are optimised by optimisation algorithms so that the settlements induced by tunnelling are minimised. The target function is evaluated by the meta model, which enables very high numerical efficiency. The results of the parameter optimisation can then be transmitted back to the crew in the tunnel as control suggestions through the process controlling system.

7 Final comments

The BIM projects presented in the previous sections for mechanised shield tunnelling show that there are numerous applications for BIM in tunnelling, which go far beyond a simple 3D visualisation and offer useful potential for application during a tunnel drive. With open designed interfaces and increasingly compatible data exchange for-

Autodesk Revit als Modellierungssoftware und der Webapplikation Procon [25] für das Prozesscontrolling. Zur Implementierung von Plugins besitzt Dynamo eine graphische Programmieroberfläche. Hier kann der Anwender bestimmte Funktionen und Abläufe graphisch implementieren und bei detaillierteren Problemen eigene Python-Skripte erstellen. Mit diesen Skripten ist es möglich, die REST-Anfragen umzusetzen und die Antworten zu verarbeiten. Procon stellt für diese Anfragen eine Programmschnittstelle (API) zur Verfügung, wobei gewisse Parameter in der generierten URL übergeben werden können, um somit die Anfrage zu parametrisieren. Die Antwort auf die Datenanfrage kann Dynamo auf unterschiedliche Weisen verarbeiten, so gibt es beispielsweise vorgefertigte JSON-Interpreter. In speziellen Fällen kann ein Python-Skript die benötigten Operationen durchführen.

6.1 Einfache Beispielszenarien

Im einfachsten Fall findet die Kommunikation nur zwischen zwei Teilmodulen des integrierten Modells statt. Ein Beispiel dafür ist die Aktualisierung der tatsächlich gebauten Tunneltrasse zum Vergleich mit der geplanten Tunnelage. Dazu können Navigations- und Ringbaudaten aus dem Prozesscontrolling-System (Ist-Daten) über eine geeignete API ausgelesen und dann durch ein passendes Dynamo-Plugin in Revit eingelesen werden, wo die modellierte Tunneltrasse (Soll-Daten) abgebildet ist. Dort kann beispielsweise die Abweichung von der Solltrasse visualisiert werden, indem man in Revit mithilfe eines Dynamo-Plugins den modellierten Tunnel je nach Abweichungsgrad einfärbt oder sogar eine zusätzliche Tunnelröhre basierend auf den Ist-Daten erzeugt und diese mit der Soll-Tunnelröhre überlagert. Darüber hinaus kann eine eventuelle Korrekturkurve berechnet und als Sollvorgabe wieder an das Prozesscontrolling-System zurückgegeben werden.

Ein anderes Beispiel ist die numerische Ermittlung von in der Tunnelröhre verbleibenden Längskräften aus

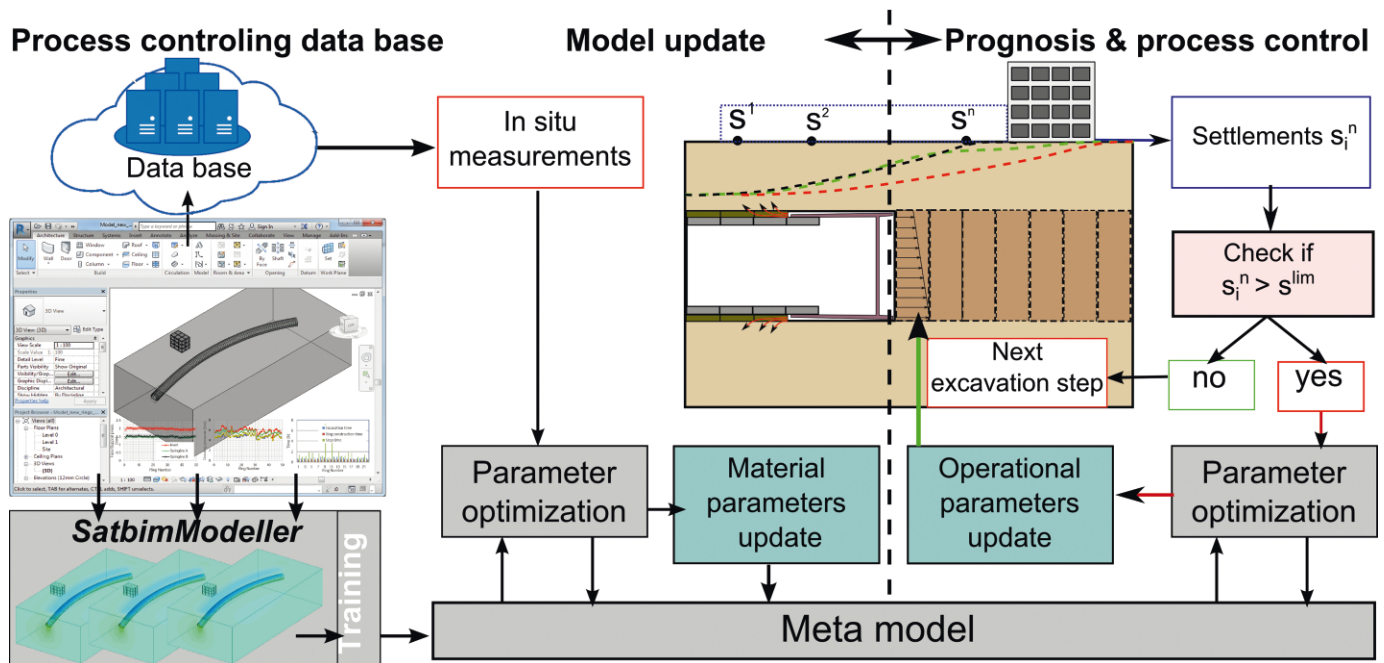


Fig. 9. Model update and adjustment of process parameters by means of simulation-based meta models
Bild 9. Modellupdate und Anpassung der Vortriebsparameter durch simulationsbasierte Metamodelle

mats, the most varied applications can be combined and can cooperate with each other on the same data basis. This simplifies not only the data maintenance and consistency but also opens the possibility of processing complex questions in a short time with highly developed software tools.

Acknowledgement

Parts of the research work presented here were financially supported by the Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) as part of the partial project C1 of the special research area SFB 837 “Interaction models for mechanised tunnelling”. The SATBIM project was supported through the Horizon 2020 research programme of the European Union as part of Marie Skłodowska Curie Stipendium No. 702874. The authors wish to express their thanks for this support.

References

- [1] Toll, D.G., Zhu, H., Osman, A., Coombs, W., Li, X., Rouainia, M. (eds.): 2nd International Conference on Information Technology in Geo-Engineering. Amsterdam: IOS Press, 2014.
- [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. Tagungsband zum 6. OKSTRA-Symposium, Köln, 2015.
- [4] 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), No. 4, pp. 499–517.
- [5] König, M., Rahm, T., Nagel, F., Speier, L.: BIM-Anwendungen im Tunnelbau. *Digitale Planung und Ausführung von Tunnelbauprojekten*. Bautechnik 94 (2017), Heft 4, S. 227–231.

den Vortriebskräften. Diese können nicht unmittelbar gemessen werden, sind 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 Meta-modell übermittelt, das dann die entsprechend verbleibenden Kräfte berechnet (Bild 8). Ein ähnliches Modell ohne direkte Anbindung an das Prozesscontrolling wurde beispielsweise in [27] verwendet.

6.2 Beispielszenario mit Modellupdate

Ein komplexeres Beispiel ist in Bild 9 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, das 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 eine sehr hohe numerische Effizienz ermöglicht. Die Ergebnisse der Parameteroptimierung können dann als Steuerungsvorschläge über das Prozesscontrolling-System zurück an die Vortriebsmannschaft übermittelt werden.

- [6] 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.
- [7] 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)*, pp. 613–620. London, 2013.
- [8] 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), Heft 11, S. 457–466.
- [9] Autodesk: Autodesk Revit. <http://www.autodesk.co.uk/products/revitfamily/>, 2017.
- [10] Bentley: Bentley MicroStation. <https://www.bentley.com/en/products/productline/modeling-and-visualization-software/microstation>, 2017.
- [11] Bentley: Bentley GenerativeComponents. <https://www.bentley.com/en/products/productline/modeling-and-visualization-software/generativecomponents>, 2017.
- [12] Graphisoft: Graphisoft ArchiCAD, <http://www.graphisoft.com/archicad/> (2017).
- [13] Graphisoft, Rhino-Grasshopper-ArchiCAD toolset. <http://www.graphisoft.com/archicad/rhino-grasshopper/>, 2017.
- [14] Nemetschek: Nemetschek Allplan. <http://www.allplan.com/>, 2017.
- [15] 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), pp. 165–179.
- [16] Jezyk, M.: The Dynamo Development team at Autodesk, *The Dynamo Primer*. V.1.1.0. <http://dynamoprimer.com/>, 2016.
- [17] Suwansawat, S., Einstein, H.: Artificial neural networks for predicting the maximum surface settlement caused by EPB shield tunneling. *Tunnelling and Underground Space Technology* 21 (2006), No. 2, pp. 133–150.
- [18] Lee, J.H., Akutagawa, S.: Quick prediction of tunnel displacements using Artificial Neural Network and field measurement results. *International Journal of the JRCM* 5 (2009), No. 2, pp. 53–62.
- [19] Kim, C., Bae, G., Hong, S., Park, C., Moon, H., Shin, H.: Neural network based prediction of ground surface settlements due to tunneling. *Computers and Geotechnics* 28 (2001), No. 6-7, pp. 517–547.
- [20] Ninić, J., Meschke, G.: Model update and real-time steering of tunnel boring machines using simulation-based meta models. *Tunnelling and Underground Space Technology* 45 (2015), pp. 138–152.
- [21] Freitag, S., Cao, B.T., Ninić, J., Meschke, G.: Hybrid surrogate modelling for mechanised tunnelling simulations with uncertain data. *International Journal of Reliability and Safety* 9 (2015), No. 2-3, pp. 154–173.
- [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), pp. 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*, No. 3/2016. pp. 1–22.
- [24] Freitag, S., Cao, B.T., Ninić, J., Meschke, G.: Recurrent neural networks and proper orthogonal decomposition with interval data for real-time predictions of mechanised tunneling processes. *Computers and Structures*. In press.
- [25] Maidl, U., Stascheit, J.: Real time process controlling for EPB shields/Echtzeit-Prozesscontrolling bei Erddruckschil-

7 Abschließende Bemerkungen

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.

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-Sklodowska-Curie-Stipendiums Nr. 702874 gefördert. Die Autoren danken für diese Unterstützung.



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



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



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



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

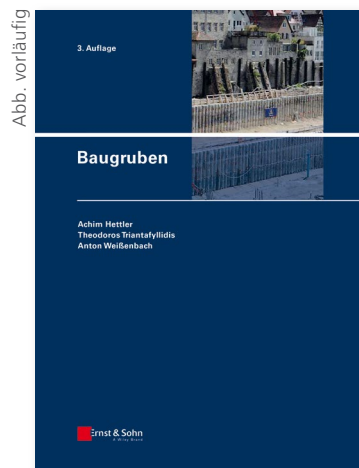
den. Geomechanics and Tunneling 7 (2014), No. 1, pp. 64–71.

[26] Keller, S.: JSON Book: Easy Learning of JavaScript Standard Object Notation. CreateSpace Independent Publishing Platform, 2016.

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



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



Achim Hettler,
Theodoros Triantafyllidis,
Anton Weißenbach
Baugruben
3., vollst. überarb. Auflage
2018. ca. 450 Seiten
ca. € 89,-*
ISBN: 978-3-433-03244-2
Auch als eBook erhältlich

Ernst & Sohn
A Wiley Brand

Die Neuauflage eines Klassikers

Das gegenüber der zweiten Auflage vollständig überarbeitete Buch behandelt die Bemessung von Baugruben, die Dimensionierung der Baugrubenwände und zugehöriger Einzelteile sowie Baugrubenkonstruktionen. Berechnungsbeispiele erläutern die Anwendung der vorgestellten Verfahren.

BUNDLE eBook + Print!
ca. € 119,-* ISBN: 978-3-433-03261-9

Online Bestellung: www.ernst-und-sohn.de

Ernst & Sohn
Verlag für Architektur und technische
Wissenschaften GmbH & Co. KG

Kundenservice: Wiley-VCH
Boschstraße 12
D-69469 Weinheim

Tel. +49 (0)6201 606-400
Fax +49 (0)6201 606-184
service@wiley-vch.de