



Berg Huettenmaenn Monatsh
<https://doi.org/10.1007/s00501-023-01409-5>
© The Author(s) 2023

BHM Berg- und
Hüttenmännische
Monatshefte

Aktuelle Forschung im Bereich der Digitalisierung des konventionellen Tunnelbaus

Robert Galler¹, Christian Huemer³, Thomas Bednar², Marco Huymajer¹, Robert Wenighofer¹, Galina Paskaleva², Bernhard Steiner² und Oleksandr Melnyk⁴

¹Lehrstuhl für Subsurface Engineering, Montanuniversität Leoben, Leoben, Österreich

²Institut für Werkstofftechnologie, Bauphysik und Bauökologie, TU Wien, Wien, Österreich

³Business Informatics Group, TU Wien, Wien, Österreich

⁴Forschungsbereich Baubetrieb und Bauverfahrenstechnik, TU Wien, Wien, Österreich

Eingegangen 25. Oktober 2023; angenommen 7. November 2023

Zusammenfassung: Die digitale Transformation hat enorme Auswirkungen auf viele Wirtschaftszweige. In jüngster Zeit hat sie in der Bauwirtschaft und insbesondere im Tunnelbau an Fahrt aufgenommen. Dieser Artikel erläutert mit der digitalen Transformation des Tunnelbaus verbundene Herausforderungen und wie sie mit einem aktuellen Forschungsprojekt begegnet werden. Das Projekt ist ein interuniversitäres und interdisziplinäres Vorhaben mit dem Ziel, die Digitalisierung im Tunnelbau voranzutreiben. Der Beitrag erörtert das Thema anhand verschiedener Anwendungsfälle, die Lösungen für die aktuellen Herausforderungen aufzeigen.

Schlüsselwörter: Konventioneller Tunnelbau, NÖT, Digitalisierung, Digitale Transformation

Current Research in the Field of Digitalisation of Conventional Tunnel Construction

Abstract: The digital transformation is having a huge impact on many sectors of the economy. Recently, it has gained momentum in the construction industry and in tunnelling in particular. This article explains the challenges associated with the digital transformation of tunnelling and how they are being addressed by a current research project. The project is an inter-university and interdisciplinary project with the aim of advancing digitalisation in tunnelling. The article discusses the topic using various use cases that demonstrate solutions to the current challenges.

Dipl.-Ing. M. Huymajer (✉)
Lehrstuhl für Subsurface Engineering,
Montanuniversität Leoben,
Erzherzog-Johann-Straße 3/III,
8700 Leoben, Österreich
marco.huymajer@unileoben.ac.at

Keywords: Conventional tunnelling, NATM, Digitalisation, Digital transformation

1. Einführung

Zwischen Österreich und Italien wird derzeit der Brenner Basistunnel errichtet, die längste unterirdische Eisenbahnverbindung der Welt. Neben dieser ingenieurtechnischen Meisterleistung sind in Österreich zahlreiche weitere gigantische Tunnelbauprojekte im Gange. Trotz der herausragenden Bedeutung dieser Infrastrukturprojekte kämpft der Tunnelbau im Vergleich zu anderen Baubranchen noch mit einem geringen Digitalisierungsgrad. Der Digitalisierung des Bauwesens wird zugeschrieben, die Produktivität zu verbessern, die Kosten zu senken und die Qualität zu steigern [1].

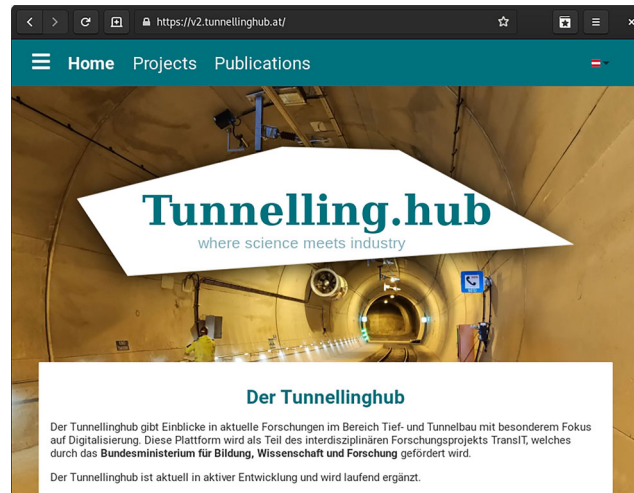
Der vorliegende Beitrag gibt einen Überblick über das Forschungsprojekt TransIT, das sich mit der Digitalisierung im konventionellen Tunnelbau beschäftigt. TransIT ist ein interuniversitäres Forschungsprojekt mit stark interdisziplinärem Charakter, das zum Ziel hat, Informatikkonzepte auf den Tunnelbau anzuwenden [2]. Diese Konzepte werden anhand von Daten des Zentrums am Berg¹ (ZaB) evaluiert, einer untertägigen Einrichtung für Forschung und Entwicklung, Ausbildung und Training [3]. Am Projekt TransIT sind die Montanuniversität Leoben, die TU Wien und die Johannes Kepler Universität Linz beteiligt. Der Bereich Tunnelbau wird im Projekt durch den Lehrstuhl für Subsurface Engineering², das Institut für Baubetrieb und Bauwirtschaft³ und das Institut für Werkstofftechnologie,

¹ <https://www.zab.at/>.

² <https://www.subsurface.at/>.

³ <https://www.tuwien.at/cee/ibb>.

Abb. 1: The Tunneling Hub



Bauphysik und Bauökologie⁴ vertreten. Der Bereich Informatik wird durch das Institut für Information Systems Engineering⁵ und das Institut für Wirtschaftsinformatik – Softwaretechnik⁶ vertreten. TransIT zeigt die digitale Transformation des Tunnelbaus anhand verschiedener Anwendungsfälle.

Dieser Beitrag gibt einen Überblick über die Errungenschaften in TransIT bis zum dritten Jahr und gibt einen Ausblick auf zukünftige Arbeiten. Der Beitrag gliedert sich wie folgt: In den Abschnitten 2 bis 7 werden verschiedene Anwendungsfälle des Projekts erörtert, und Abschnitt 8 fasst die Ergebnisse zusammen und blickt auf zukünftige Entwicklungen im Projekt.

2. Tunnelling Hub

Für die digitale Transformation des Tunnelbaus ist die Zusammenarbeit verschiedener Forschungsbereiche, wie Bauingenieurwesen, Geologie, Hydrologie und Informatik, von entscheidender Bedeutung. Es hat sich jedoch gezeigt, dass es nur wenig Zusammenarbeit zwischen verschiedenen Forschungsbereichen innerhalb der Tunnelbaudomäne gibt [4]. Darüber hinaus gibt es nur unzureichende Zusammenarbeit zwischen den drei Bereichen Lehre, Forschung und Industrie.

Um diese Herausforderung zu bewältigen, wurde im Zuge des Projektes der sogenannte Tunnelling Hub entwickelt. Der Tunnelling Hub ist eine domänenübergreifende Plattform zur Vernetzung im Bereich der Digitalisierung des Tunnelbaus, bestehend aus Akteuren aus Lehre, Forschung und Industrie. Dabei ist der offene Charakter von wesentlicher Bedeutung, was durch die Verwendung von Konzepten wie Open-Source-Software, offener Daten und offenem Wissenszugang erreicht werden soll. Ein Publikationsverzeichnis gibt allen Beteiligten einen Überblick über die aktuelle

Forschung zur Digitalisierung im Tunnelbau. Das Publikationsverzeichnis sammelt Informationen aus verschiedenen Onlinequellen und erstellt eine Sammlung relevanter Publikationen. Die Sammlung enthält wichtige Metadaten und einen Verlagslink, über den die Volltextversion abgerufen werden kann. Darüber hinaus bietet der Tunnelling Hub ein Verzeichnis von Anwendungsfällen, das Projektmitgliedern und anderen Branchenteilnehmern ermöglicht, ihre Ergebnisse im Bereich der Digitalisierung des Tunnelbaus zu teilen. Das Verzeichnis ermöglicht es, digitale Medien wie Texte, Bilder, Videos oder allgemeine Daten eines bestimmten Anwendungsfalls, zu präsentieren.

Technisch gesehen ist der Tunnelling Hub eine interaktive Website, die auf moderner und offener Technologie basiert. Bei der Umsetzung werden ausschließlich freie Softwarekomponenten verwendet und Daten in maschinenlesbarer Form über Schnittstellen angeboten. Das Hauptaugenmerk liegt auf Flexibilität, die es erlaubt, zukünftige Anforderungen agil zu berücksichtigen. Eine Weiterführung der Plattform nach Projektende soll einen nachhaltigen Beitrag zur Digitalisierung des Tunnelbaus leisten. Um zukünftige Wartungskosten gering zu halten, wurde bei der Entwicklung auf bestehende Softwarekomponenten zurückgegriffen. Webanwendungen lassen sich in der Regel in eine Backend, das typischerweise in einem Rechenzentrum läuft, und eine Frontend, das im Browser des Nutzers läuft, unterteilen. Der Tunnelling Hub nutzt ein Web-Framework, das im Backend das Model-View-Template-Paradigma verwendet [5]. Als Frontend-Technologie wird eine moderne JavaScript-Bibliothek verwendet [6]. Die gewählten Technologien ermöglichen eine sogenannte Single-Page-Anwendung, bei der der Inhalt der betrachteten Website bei Benutzerinteraktion dynamisch verändert wird. Dies erzielt ein besseres Benutzererlebnis verglichen mit Websites, bei denen der Browser Seiten neu laden muss.

Der aktuelle Stand der Entwicklung kann online abgerufen werden⁷. Abb. 1 zeigt einen Aufruf des Tunnelling Hubs im Webbrowser. Die Implementierung des Publikationsver-

⁴ <https://www.tuwien.at/cee/mbb>.

⁵ <https://www.big.tuwien.ac.at/>.

⁶ <https://se.jku.at/>.

⁷ <https://v2.tunnellinghub.at/>.

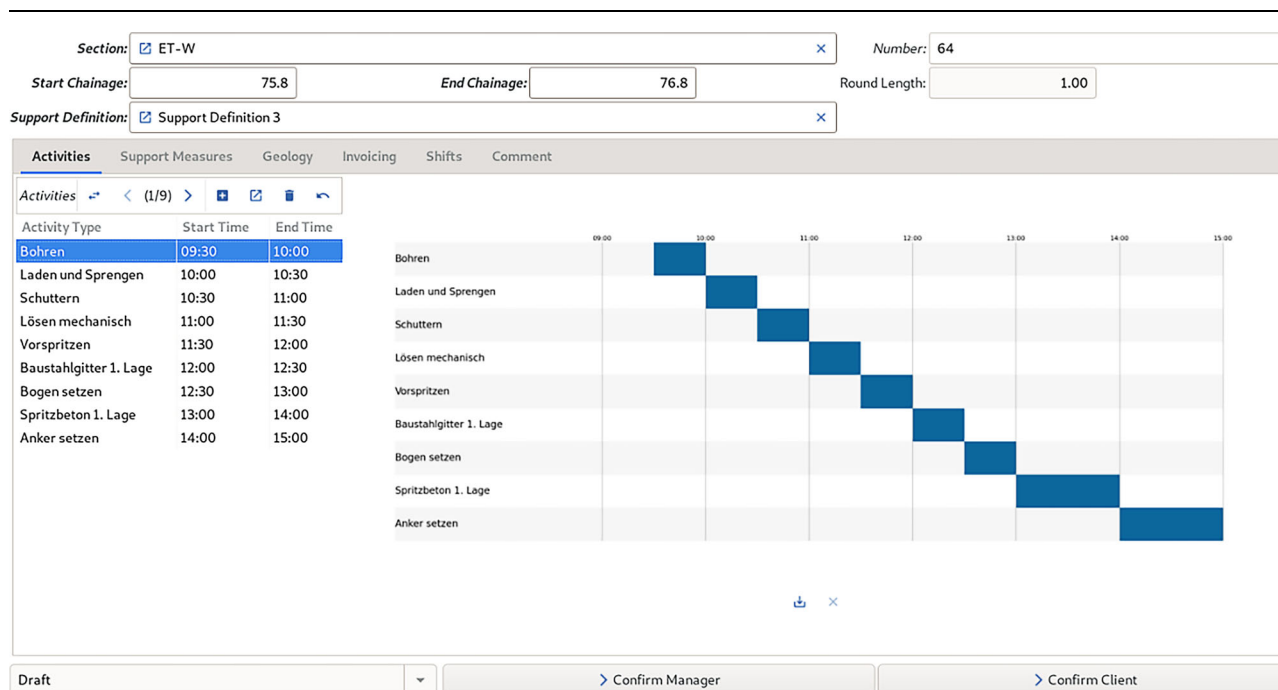


Abb. 2: Die Benutzeroberfläche von TIMS

zeichnisses und des Verzeichnisses von Anwendungsfällen ist abgeschlossen.

Zukünftige Arbeiten umfassen die Erweiterung des Tunneling Hub um eine Benchmarkingfunktion. Außerdem planen wir, den Tunneling Hub als digitale Zwillingsumgebung zu nutzen. Wir arbeiten auch daran, die Benutzeroberfläche zu verbessern.

3. Tunneling Information Management System

Die Durchführung heutiger Tunnelbauprojekte erfordert eine umfangreiche Dokumentation [7]. Aufgrund des umfassenden Einsatzes von Building Information Modeling (BIM) ist die Planungsphase von Tunnelbauprojekten bereits weitgehend digitalisiert. Andererseits werden in der Bauphase noch häufig Papierdokumente oder unstrukturierte Daten wie Tabellenkalkulationen zur Datenspeicherung und zum Datenaustausch verwendet, was zahlreiche Nachteile mit sich bringt [8]. Die Erstellung und Bearbeitung dieser Dokumente ist mit erheblichem Aufwand verbunden und stellt eine potenzielle Fehlerquelle dar.

Zur Lösung dieser Probleme wurde das Tunneling Information Management System (TIMS) vorgestellt [9]. TIMS ist eine Softwareanwendung zur Verwaltung von Daten aus dem Tunnelvortrieb. Über eine optimierte Benutzeroberfläche können die Daten direkt dort erfasst werden, wo sie entstehen, nämlich an der Ortsbrust im Tunnel. Nachdem die Daten von der Projektleitung geprüft, korrigiert und bestätigt wurden, können die Daten in gängige Softwaretools exportiert werden, wodurch ein durchgängig digitaler Datenfluss erreicht wird.

TIMS basiert auf einer modernen und freien Software-Plattform⁸, die eine schnelle Anwendungsentwicklung ermöglicht. Die Plattform stellt eine breite Palette von Funktionen zur Verfügung, die in moderner Software zu finden sind, wie z. B. objektrelationales Mapping, Benutzerverwaltung, Zugriffskontrolle, eine Workflow-Engine, eine View-Engine, eine Report-Engine und Funktionen zur Internationalisierung. Im Zuge des Projektes wurden zwei verschiedene Benutzeroberflächen implementiert. Eine Benutzeroberfläche ist für die mühelose Dateneingabe direkt im Tunnel optimiert. Die zweite Benutzeroberfläche, die in Abb. 2 dargestellt ist, bietet einen breiteren Funktionsumfang und ist für die Verwendung von der Projektleitung und der örtlichen Bauaufsicht gedacht. Alle Daten sind in einem maschinenlesbaren Format über eine Anwendungsschnittstelle (Application Programming Interface, API) zugänglich.

Der gewählte BIM-Ansatz wurde mit Vortriebsdaten eines Monats am ZaB evaluiert [10]. Dabei wurde eine Abrechnung, einschließlich zeitgebundener Kosten, für den Vortriebsmonat durchgeführt und mit einer herkömmlich erstellten Abrechnung verglichen [11]. Die Ergebnisse zeigen, dass sich der gesamte Abrechnungsprozess digitalisieren lässt. Ferner wurde eine Richtlinie zum Einsatz von Industry Foundation Classes⁹ (IFC) in der Ausführungsphase von konventionellen Tunnelvortrieben erarbeitet [12].

Derzeit findet eine Evaluierung der IFC-Richtlinie mithilfe von Vortriebsdaten des ZaBs statt. Darüber hinaus arbeiten wir daran, verschieden IFC-basierte Modellierungsansätze in der Planungsphase zu vergleichen.

⁸ <https://www.tryton.org/>.

⁹ <https://standards.buildingsmart.org/>.

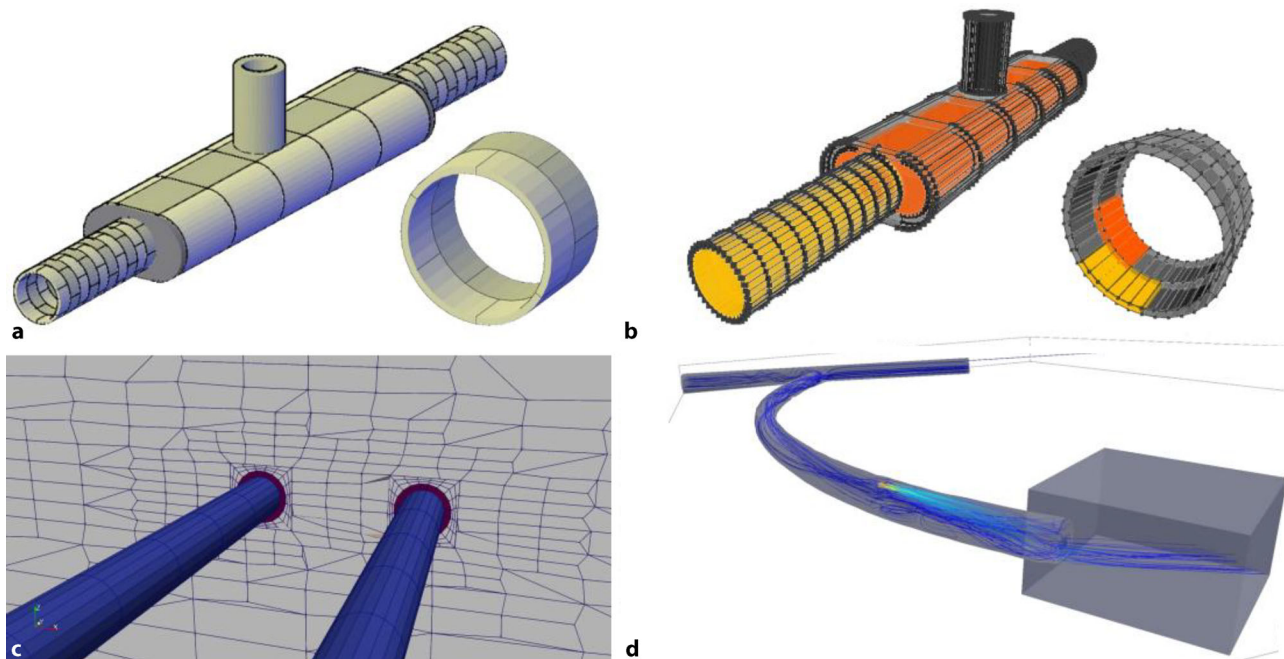


Abb. 3: Das ursprüngliche Tunnelmodell (a) wird in SIMULTAN MDM importiert (b), das Simulationsgitter (c) wird generiert und OpenFOAM wird zur Berechnung der Luftströmung verwendet (d)

4. Digital Twins for Tunneling – Anwendungsfall Lüftungssimulation

Eine der größten Herausforderungen sowohl in der Planungs- als auch in der Betriebsphase eines Tunnels ist es, alle Arten von Informationen in einer gemeinsamen Datenumgebung (Common Data Environment, CDE) zu speichern. Ein CDE unterstützt den Entwurf und die Ausführung digitaler Zwillinge, ein bekanntes Konzept in der Bauindustrie [13]. Digitale Zwillinge ermöglichen den Gebäudebetreibern, ihre Gebäude zu überwachen und die Systeme des Gebäudes auf der Grundlage der gemessenen Daten zu steuern. Das Hauptziel des Anwendungsfalls ist die Entwicklung eines digitalen Zwillings für den Tunnelbau, was am Beispiel einer Lüftungssimulation gezeigt werden soll. Die Simulationsergebnisse und die gemessenen Sensordaten des Tunnels können verwendet werden, um das Belüftungssystem des Tunnels zu steuern.

Der Anwendungsfall beginnt mit dem Import eines Tunnelmodells aus Civil3D (Abb. 3a) in das SIMULTAN-Datenmodell (Abb. 3b). Civil3D ist ein im Tunnelbau weit verbreitetes kommerzielles Softwarewerkzeug. Auf Basis der importierten Tunnelgeometrie wird die Gittergeometrie für die Lüftungssimulation erzeugt (Abb. 3c). Der Wärmeübergang wird mit einer Computational-Fluid-Dynamics-Simulation (CFD-Simulation) in OpenFOAM¹⁰ simuliert (Abb. 3d). Das Simulationsgitter wird zusammen mit den Simulationsergebnissen im ursprünglichen SIMULTAN-Modell sowohl zur Dokumentation als auch zur späteren Wiederverwendung des bestehenden Gitters gespeichert.

Der digitale Zwilling wird im Open-Source-Datenmodell SIMULTAN¹¹ [14, 15] modelliert, das bereits erfolgreich für digitale Zwillinge von Gebäuden eingesetzt wurde [16–18]. SIMULTAN wird von der TU Wien, Forschungsbereich Bauphysik entwickelt und ermöglicht Nutzern, im Vergleich zu traditionellen Datenmodellen, wie beispielsweise IFC, Daten flexibler zu organisieren. Dies ermöglicht eine schnellere Prototypentwicklung in Forschungsprojekten. Da SIMULTAN bisher noch nicht im Tunnelbau verwendet wurde, soll es um tunnelbauspezifische Funktionen erweitert werden. Es besteht die Notwendigkeit, mehrere geometrische Darstellungen des Tunnels (Tunnelausrichtung, Tunnelabschnitte und Gitter für die Lüftungssimulation) gleichzeitig zu speichern. Deshalb soll das SIMULTAN-Modellierungswerkzeug um ein Multigeometriesystem erweitert werden.

Schließlich wird ein physisches Modell eines Tunnels erstellt. Es soll Studierenden ermöglichen, mit dem digitalen Zwilling zu interagieren, einschließlich Simulationen und Sensordaten, sowie mit anderen IoT-Geräten (Internet der Dinge, engl. Internet of Things), wie z. B. der Steuereinheit eines Ventilators. Dieser Prototyp wird es Studierenden ermöglichen, mit verschiedenen Algorithmen zu experimentieren, ohne das Risiko einzugehen, in einer realen Tunnelumgebung zu arbeiten.

5. Erweiterte Realität

Erweiterte Realität (engl. Augmented Reality, AR) ist dabei, ein integraler Bestandteil der Bauwirtschaft zu werden. Die

¹⁰ <https://www.openfoam.com/>.

¹¹ <https://github.com/bph-tuwien/SIMULTAN>.

Einbindung von AR-Technologie in den Bauprozess kann das räumliche Bewusstsein, die Visualisierung und die Animation verbessern und bietet wertvolle Vorteile, ohne traditionelle Materialien zu ersetzen [19]. Mehrere Plattformen, wie der „AR-gestützte Unterricht“, könnten die Erstellung interaktiver AR-Szenen unter Verwendung von BIM-Modellen erleichtern und so Fernunterricht und Zusammenarbeit fördern [20]. Positive Effekte von AR gehen über den Bildungsbereich hinaus, da sie die Motivation, die Lernerfahrungen und das Verständnis für komplexe Sachverhalte verbessern [21–24]. Zahlreiche Studien haben zudem die günstigen Lernergebnisse von AR im Vergleich zu herkömmlichen Lehrbüchern nachgewiesen [25–27]. Durch die Integration von Mixed Reality (VR, AR) mit BIM wird die Lernumgebung in der Bauingenieurausbildung weiter verbessert [28]. Trotz der erwiesenen Vorteile von AR für die Lernergebnisse ist ihre Nutzung in der Hochschulbildung aufgrund von Ressourcenbeschränkungen und Problemen mit der Zugänglichkeit jedoch nach wie vor begrenzt [29]. Wie Urban et al. [20] gezeigt haben, birgt AR ein großes Versprechen für die Zukunft der Branche und hat das Potenzial, den Tunnelbau und andere AEC-Disziplinen zu revolutionieren. Neben der Ausbildung bietet AR zahlreiche Vorteile für die Tunnelbauindustrie [30, 31]. AR kann Echtzeit-Visualisierungen und Überlagerungen digitaler Informationen mit der physischen Umgebung liefern, so dass Ingenieure und Bauarbeiter komplexe Tunnelentwürfe besser verstehen und interpretieren können [32]. Durch die Überlagerung von virtuellen Modellen, Plänen und Daten auf der Baustelle ermöglicht AR die präzise Ausrichtung von Tunnelkomponenten, wodurch Fehler reduziert und die Gesamtgenauigkeit während des Baus verbessert werden [33]. Außerdem kann AR vor Ort Anleitungen und Anweisungen geben, Schritt-für-Schritt-Anweisungen und Sicherheitsinformationen direkt im Sichtfeld der Arbeiter anzeigen [34]. Dadurch wird sichergestellt, dass die Bauaufgaben korrekt und entsprechend den Vorgaben ausgeführt werden, was die Produktivität erhöht und Minimierung von Fehlern. Darüber hinaus kann AR für die effektive Wartung und Inspektion von Tunnelbauwerken eingesetzt werden. Durch das Überlagern digitaler Informationen auf physische Komponenten können Inspektoren schnell potenzielle Probleme oder Anomalien wie Risse, Korrosion oder strukturelle

Verformungen [35]. Dies ermöglicht rechtzeitige Erkennung von Problemen, was eine proaktive Wartung erleichtert und Langlebigkeit und Sicherheit der Tunnelinfrastruktur zu gewährleisten.

TransIT hat Fortschritte bei der Beantwortung der Forschungsfragen zu AR im konventionellen Tunnelbau gemacht (Abb. 4). Die durchgeführte Studie untersucht insbesondere den potenziellen Einsatz von AR zur Lokalisierung in Tunneln und erforscht die Anwendung von AR-basierter Baustelleninspektion zur Dokumentation von Problemen im Tunnelbau [36]. Die Studie zielt auch darauf ab, die Effektivität der entwickelten Prototypen in einer Tunnelumgebung zu evaluieren und ihre Fähigkeit, traditionelle Baustelleninspektionsverfahren zu verbessern. Der in dieser Studie entwickelte Lokalisierungsprototyp (Abb. 4) zeigt vielversprechende Ergebnisse und bietet zuverlässige Lösungen für die Kartierung von Tunneln unter Verwendung des World Lock Tool Frameworks und von Space Pins [36]. Die Einbeziehung physischer Marker bietet eine Backup-Lösung für den Fall, dass der Prototyp virtuelle Marker nicht erkennt, und gewährleistet so Robustheit in unterschiedlichen Umgebungen.

Benutzertests und Befragungen von Fokusgruppen zeigen, dass der Prototyp intuitiv zu bedienen ist, obwohl einige Probleme bei AR-basierten Tunnelbauanwendungen festgestellt wurden, die verbessert werden müssen. Dazu gehören die Verbesserung der Führungsinformationen auf der Benutzeroberfläche und die Behebung der langsamen Eingabegeschwindigkeit im Zusammenhang mit Tastaturinteraktionen. Die Untersuchung zeigt, dass AR-Anwendungen für die Lokalisierung von Tunneln und die Inspektion von Baustellen mit derzeit verfügbarer Hardware realisierbar sind. AR bietet Vorteile wie räumliche Maschenerkennung, GPS-freie Lokalisierung und freihändige Bedienung, wodurch verschiedene Dokumentationsprozesse während der Bauarbeiten beschleunigt werden. Allerdings müssen die Herausforderungen im Zusammenhang mit der Erkennung von Handgesten, der räumlichen Maschenerkennung, der niedrigen Bildrate und dem engen Sichtfeld in zukünftigen Iterationen angegangen werden. Es wird erwartet, dass Fortschritte in der AR-Gerätetechnologie diese Probleme lösen werden.

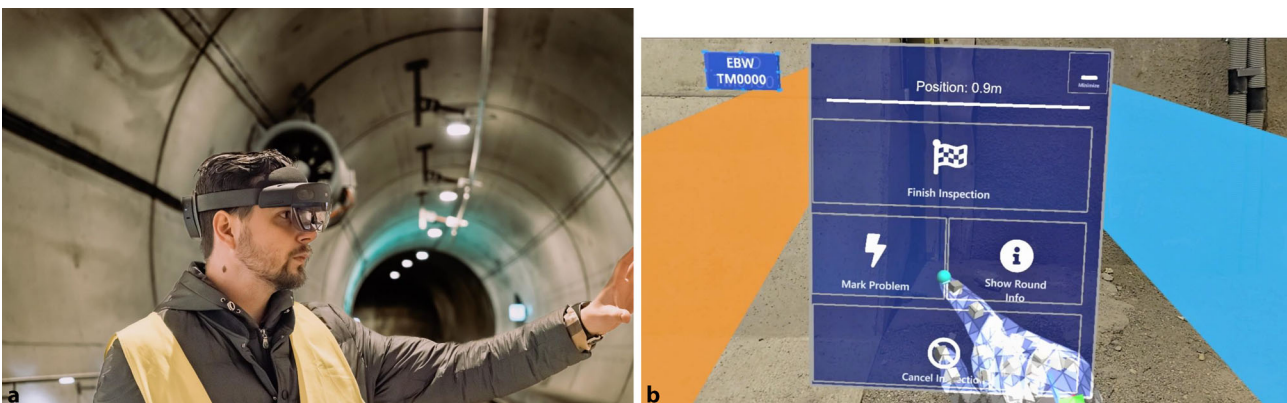


Abb. 4: Benutzung des AR-Headsets in einem Tunnel (a) und der AR-Softwareprototyp (b)

6. Digital Academic Program

Bei der digitalen Transformation der Bauwirtschaft sind neue Werkzeuge und Lösungsansätze für ökologisch optimierte und nachhaltige Planungs-, Konstruktions- und Fertigungsprozesse unabdingbar. Die zukünftige Entwicklung findet an den Schnittstellen zwischen Informatik und den klassischen Disziplinen des Bau- und Umweltingenieurwesens statt und erfordert Ingenieure mit einer starken interdisziplinären Ausbildung.

Um diesen neuen Berufsprofilen gerecht zu werden, werden neue Bildungsprogramme benötigt. In dieser Hinsicht kann der TransIT als Beschleuniger für diese Entwicklung angesehen werden. Basierend auf den Erfahrungen in TransIT werdendie TU Wien und die Montanuniversität Leoben ein neues interuniversitäres Masterstudium Digitale Bauingenieurwissenschaften einrichten. Dieses Programm befasst sich mit IT (Informationstechnologie) im Tunnelbau, ist jedoch breiter angelegt, um jede Art von Digitalisierung im Bauwesen zu behandeln.

In diesem Masterstudiengang werden Studierende interdisziplinär ausgebildet. Sie erwerben alle notwendigen Grundkenntnisse sowohl aus der Informatik als auch aus dem Bauingenieurwesen, um darauf aufbauend gezielt interdisziplinäres Wissen zum digitalen Planen, Bauen und Betreiben zu erwerben. So können Studierende verschiedene Konzepte der Informatik, die als Treiber der Digitalisierung fungieren, im Kontext des Bauingenieurwesens anwenden. Damit erkennen Studierende das Potenzial dieser Konzepte für die Bauwirtschaft, haben die Kompetenz, diese Konzepte in der Bauwirtschaft umzusetzen, und können Risiken und Konsequenzen dieser Umsetzung im Hinblick auf Lebenszyklusmanagement und Nachhaltigkeit abschätzen. Mit diesen Kompetenzen verfügen Studierende über ein ganzheitliches Verständnis der Digitalisierung in der Bauwirtschaft und treiben den digitalen Transformationsprozess im Hoch- und Tiefbau voran. Auf diese Weise tragen sie dazu bei, die Effizienz, Qualität und Nachhaltigkeit der Bauwirtschaft zu steigern.

Derzeit arbeiten die TU Wien und die Montanuniversität Leoben am Entwurf des gemeinsamen Curriculums, das 2024 veröffentlicht werden soll. Es wird erwartet, dass dieses Programm, das auf hybriden Lerntechnologien basiert und durch ein entsprechendes Mobilitätskonzept unterstützt wird, im Herbst 2024 startet.

7. Zusammenfassung

In diesem Beitrag wurden einige der Herausforderungen im Tunnelbau skizziert und es wurde erörtert, wie verschiedene Digitalisierungskonzepte eingesetzt werden können, um diese Herausforderungen zu bewältigen. Der Beitrag gibt außerdem einen Ausblick auf einige in diesem Projekt entstandene Veröffentlichungen, die weiterführende Informationen zu den Projektergebnissen beinhalten.

Die Auswirkungen des Projekts gehen weit über die reinen Softwareartefakte und die Verbreitung innerhalb der Gruppe der Forschungspartner hinaus. Im Laufe des Projekts wurde die Zusammenarbeit zwischen den Bereichen Tunnelbau und Informatik nachhaltig gestärkt. Mit der verstärkten Zusammenarbeit zwischen den Forschungsbereichen wurde auch die interuniversitäre Zusammenarbeit gestärkt. Auf Seiten der Informatik hat TransIT dazu beigetragen, die Herausforderungen im Tunnelbau zu verstehen. Auf der Seite des Tunnelbaus war es möglich, einen Überblick über die Konzepte der Informatik zu gewinnen und zu erkennen, wie die Konzepte im Tunnelbau eingesetzt werden können. Die Zusammenarbeit der Bereiche spiegelt sich auf allen Ebenen der Forschungsinstitute wider – von professoraler bis studentischer Ebene.

Das Projekt ist voll im Gange und wird zukünftig weitere Beiträge zur digitalen Transformation des Tunnelbaus liefern.

Funding. Open access funding provided by Montanuniversität Leoben.

Open Access Dieser Artikel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden.

Die in diesem Artikel enthaltenen Bilder und sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende nichts anderes ergibt. Sofern das betreffende Material nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht und die betreffende Handlung nicht nach gesetzlichen Vorschriften erlaubt ist, ist für die oben aufgeführten Weiterverwendungen des Materials die Einwilligung des jeweiligen Rechteinhabers einzuholen.

Weitere Details zur Lizenz entnehmen Sie bitte der Lizenzinformation auf <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>.

Literatur

1. Huymajer, M., Winkler, L.: Digitalisierung als eine Maßnahme zur Lösung der Probleme in der Bauwirtschaft. In: Goger, G., Winkler, L. (Hrsg.) Kolloquium Zukunftsfragen des Baubetriebs. Komplexe Baubetriebssysteme. TU Verlag (2018).
2. Mazak-Huemer, A., Galler, R., Wenighofer, R., Goger, G., Bednar, T., Huemer, C., Wimmer, M.: TransIT: Interdisziplinäres Forschungsprojekt zur digitalen Transformation im Tief- und Tunnelbau. *bau aktuell* **11**(4), 168–169 (2020). https://publik.tuwien.ac.at/files/publik_289769.pdf, Zugegriffen: 08.04.2020
3. Galler, R.: Research@ZaB – Start of construction of the „ZaB – Zentrum am Berg“ research and development, training and education centre / Research@ZaB – Baubeginn für das Forschungs- und Entwicklungs- sowie Trainings- und Schulungszentrum Zentrum am Berg. *Geomech. Tunn.* **9**(6), 715–725 (2016). <https://doi.org/10.1002/geot.201620062>.
4. Huymajer, M., Woegerbauer, M., Winkler, L., Mazak-Huemer, A., Biedermaier, H.: Interdisciplinary Systematic Review on Sustainability in Tunneling – Bibliometrics, Challenges, and Solutions. *Sustainability*. An **14**(4), 2275 (2022). <https://doi.org/10.3390/su14042275>
5. Shaw, B., Badhwar, S., Guest, C., Chandra, B.K.S.: Web Development with Django. A definitive guide to building modern Python web applications using, 2. Aufl. Django, Bd. 4. Packt Publishing, Birmingham, UK, S. 7–15 (2023)

6. Yin, M.: Build SPA with React and Wagtail. Victoria, British Columbia, Canada: Leanpub (2020). <https://leanpub.com/react-wagtail>, Zugriffen: 07.11.2023
7. Melnyk, O., Raab, J., Lulei, F.: ÖNORM B 2203-1 as a Supplement to FIDIC Emerald Book in Conventional Tunnel Construction. *Buildings* **13**(7), 1837 (2023). <https://doi.org/10.3390/buildings13071837>.
8. Kvasina, G.: Dokumentation bei zyklischem Tunnelvortrieb. Erhebung von wesentlichen Parametern von Bauzeit und Kosten als Grundlage für ein digitales Modell. MA thesis. TU Wien (2018). <https://doi.org/10.34726/hss.2018.43926>.
9. Huymajer, M., Operta, D., Mazak-Huemer, A., Huemer, C.: The Tunneling Information Management System – A tool for documenting the tunneling process in NATM projects. *Geomech. Tunn.* **15**(3), 259–264 (2022). <https://doi.org/10.1002/geot.202100064>.
10. Melnyk, O., Huymajer, M., Huemer, C., Galler, R.: Digitalization in the Construction Industry: The Case of Documentation and Invoicing in Tunneling. *Czechia, June, Prague*, S. 21–23 (2023).
11. Stift, L.: Automatisierte Ermittlung zeitgebundener Kosten im Tunnelbau. Masterarbeit. Montanuniversität Leoben, (2023) <https://doi.org/10.34901/mul.pub.2023.223>
12. Huymajer, M., Paskaleva, G., Wenighofer, R., Huemer, C., Mazak-Huemer, A.: IFC Concepts in the Execution Phase of Conventional Tunneling Projects. *Tunnelling and Underground Space Technology* **143**, 105368 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.tust.2023.105368>
13. Borrmann, A., König, M., Koch, C., Beetz, J. (Hrsg.): *Building Information Modeling. Technology Foundations and Industry Practice*. Springer, Cham (2018). <https://doi.org/10.1007/978-3-319-92862-3>.
14. Paskaleva, G., Lewis, T., Wolny, S., Steiner, B., & Bednar, T. (2019). SIMULTAN as a Big-Open-Real-BIM Data Model—Proof of Concept for the Design Phase. In: *Proceedings of the 21st CIB World Building Congress. Constructing Smart Cities Conference: 21nd CIB World Building Congress, Hong Kong SAR, China, 17–21 Jun 2019*, S. 1105–1115. http://www.irbnet.de/daten/iconda/CIB_DC33670.pdf. Zugriffen: 29.11.2023.
15. Paskaleva, G., Wolny, S., Bednar, T.: Big-Open-Real-BIM Data Model—Proof of Concept. In: *IBPC, Bd. 2018. Healthy, Intelligent and Resilient Buildings and Urban Environments*, S. 1083–1088 (2018).
16. Steiner, B., Sarkany, A., Járosi, Z., Paskaleva, G., Bednar, T., Bauer, C.: Development of Plugins for seamless Integration of the SIMULTAN Meta Data Model with IDA-ICE and RFEM 6. Presented at 13th Nordic Symposium on Building Physics (2023).
17. Bühler, M., Steiner, B., Bednar, T.: Digital Twin Applications Using the SIMULTAN Data Model and Python. *lop Conf. Series: Earth Environ. Sci.* **1101**(8), 82015 (2022). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1101/8/082015>.
18. Paskaleva, G., Lewis, T., Wolny, S., & Bednar, T. (2019). SIMULTAN as a Big-Open-Real-BIM Data Model—Evolution of Virtual Building from Design through Construction into Operation Phase. In: *Proceedings of the 21st CIB World Building Congress. Constructing Smart Cities Conference: 21nd CIB World Building Congress, Hong Kong SAR, China, 17–21 Jun 2019*, S. 1116–1126. http://www.irbnet.de/daten/iconda/CIB_DC33671.pdf. Zugriffen: 29.11.2023.
19. Chacón, R.: Designing Construction 4.0 Activities for AEC Classrooms. *Buildings* **11**(11), 511 (2021). <https://doi.org/10.3390/buildings11110511>.
20. Urban, H., Pelikan, G., Schranz, C.: Augmented Reality in AEC Education: A Case Study. *Buildings* **12**(4), 391 (2022). <https://doi.org/10.3390/buildings12040391>.
21. Thoms, L.-J.: *Lehr-Lernpsychologische Grundlagen*. In: *Spektrometrie im Fernlabor*. Wiesbaden. Springer Spektrum, Germany, S. 33–69 (2019).
22. Khan, T., Johnston, K., Ophoff, J.: The Impact of an Augmented Reality Application on Learning Motivation of Students. *Adv. Human-computer Interact.* **2019**, 7208494 (2019). <https://doi.org/10.1155/2019/7208494>.
23. Niedermeier, S., Müller-Kreiner, C.: VR/AR in der Lehre!? Eine Übersichtsstudie zu Zukunftsvisionen des digitalen Lernens aus der Sicht von Studierenden. *Kempton, Germany: Hochschule für angewandte Wissenschaften Kempton*, S. 13 (2019).
24. Joan, D.: Enhancing Education through Mobile Augmented Reality. *J Sci Educ Technol.* **11**, 8–14 (2015).
25. von Jan, U., Noll, C., Behrends, M., Albrecht, U.-V.: MARble—Augmented Reality in Medical Education. *Biomed. Eng.* **57**, 67–70 (2012).
26. Pathania, M., Mantri, A., Kaur, D., Singh, C., Sharma, B.: A Chronological Literature Review of Different Augmented Reality Approaches in Education. *Technology, Knowledge and Learning* **28**, 329–346 (2023). <https://doi.org/10.1007/s10758-021-09558-7>
27. Albrecht, U.-V., Folta-Schoofs, K., Behrends, M., von Jan, U.: Effects of Mobile Augmented Reality Learning Compared to Textbook Learning on Medical Students: Randomized Controlled Pilot Study. *J Med Internet Res* **15**, e182 (2013).
28. Vasilevski, N., Birt, J.: Analysing Construction Student Experiences of Mobile Mixed Reality Enhanced Learning in Virtual and Augmented Reality Environments. *Research in Learning. Technology* **28**, 2329 (2020).
29. Yuen, S.-Y., Yaoyuneyong, G., Johnson, E.: Augmented Reality: An Overview and Five Directions for AR in Educ. *J. Educ. Technol. Dev. Exch.* **4**, 119–140 (2011).
30. Gu, N., Singh, V., & Wang, X. (2010). Applying Augmented Reality for Data Interaction and Collaboration in BIM. In B. Dave, A. I. K. Li, N. Gu, & H. J. Park (Hrsg.), *Proceedings of the 15th International Conference on Computer-Aided Architectural Design Research in Asia (caadria 2010): New Frontiers* (pp 511–520). Caadria-Assoc Computer-Aided Architectural Design Research Asia.
31. Zollmann, S., Hoppe, C., Kluckner, S., Poglitsch, C., Bischof, H., Reitmayr, G.: Augmented Reality for Construction Site Monitoring and Documentation. *Proc. IEEE* **102**(2), 137–154 (2014). <https://doi.org/10.1109/JPROC.2013.2294314>.
32. Mesaros, P., Soltes, T., & Mesarosova, A. (2014). Augmented Reality and Reverse Engineering as Innovative Approaches for Planning and Modelling the Sustainable Reconstruction of Buildings. In: *Geoconference on Informatics, Geoinformatics and Remote Sensing, Vol I*, pp. 465–472.
33. Gimeno, J., Morillo, P., Casas, S., & Fernandez, M. (2011). An Augmented Reality (AR) CAD System at Construction Sites. In A. Y. C. Nee (Hrsg.), *Augmented Reality—Some Emerging Application Areas* (pp 15–32). InTech, <https://doi.org/10.5772/26801>.
34. Katika, T., Konstantinidis, F.K., Papaioannou, T., Dadoukis, A., Bolierakis, S.N., Tsimiklis, G., Amditis, A.: Exploiting Mixed Reality in a Next-Generation IoT ecosystem of a construction site. In, Bd. 2022. *IEEE Press, IEEE International Conference on Imaging Systems and Techniques (IST)*. Kaohsiung, Taiwan, S. 1–6 (2022). <https://doi.org/10.1109/IST5454.2022.9827726>.
35. Shin, D.H., Dunston, P.S.: Technology development needs for advancing Augmented Realitybased inspection. *Autom. Constr.* **19**(2), 169–182 (2010). <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2009.11.001>.
36. Fenzl, D.: Opportunities of Augmented Reality Applications in Tunnel Construction. MA thesis. TU Wien (2022). <https://doi.org/10.34726/hss.2022.106681>.

Hinweis des Verlags. Der Verlag bleibt in Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutsadressen neutral.