

BIM „as will be“ in der Bauwerkserhaltung – Ist- und Sollzustände in prädiktiven BIM-Modellen

Hendrik Morgenstern, Michael Raupach

*Institut für Baustoffforschung (ibac),
RWTH Aachen University,
Schinkelstr. 3, 52062 Aachen, Germany*

morgenstern@ibac.rwth-aachen.de

Kurzfassung

Im Zuge der Instandhaltung von Gebäuden und der gebauten Infrastruktur kommt der Erfassung des Ist-Zustandes sowie der Dokumentation der geplanten und durchgeführten Arbeiten eine zentrale Bedeutung zu. Dieser Beitrag soll beispielhaft zeigen, wie Rohdaten der Bauwerksdiagnose für eine schnittstellenoffene Nutzung in BIM aufbereitet und weiterverarbeitet werden können. Die bisherigen Erkenntnisse der Forschungsarbeiten zeigen, dass Building Information Modeling in der Bauwerkserhaltung ein großes Potenzial für effektive Bauwerksdiagnosen und ein effizientes Lebensdauermanagement birgt. Es entsteht eine Art digitales Bauwerksbuch, das alle relevanten Daten in einer IFC-Datei bündelt und übersichtlich darstellen kann. Die Daten sind sicher, kompakt und frei verfügbar für alle Beteiligten.

Ein mit Diagnosedaten angereichertes BIM-Modell bietet signifikante Möglichkeiten zur Automatisierung und Unterstützung der Instandsetzungsplanung und -ausführung. Durch die räumliche Verortung der Untersuchungsergebnisse in einem dreidimensionalen Kontext können Diagnoseergebnisse automatisiert gegenübergestellt und so bspw. Exzentrizitäten oder Neigungen von Bewehrungskörben in Stahlbetonstützen kalkuliert werden. In Verbindung mit der Lokalisierung von Schadstellen können auf diese Weise Schadensursachen einfacher identifiziert werden. Anhand der implementierten Carbonatisierungstiefen und Chloridgehalte werden im Hintergrund der BIM-Umgebung für verschiedene Dauerhaftigkeitsmodelle automatisiert Bayes'sche Netze erstellt und kalibriert, um somit zuverlässigere Prognosen über den zukünftigen Bauteilzustand zu ermöglichen. Durch die Implementierung von maschinenlesbaren Entscheidungsbäumen auf Basis der Technischen Regel Instandhaltung von Betonbauwerken (TR IH) können für ausgewählte Instandsetzungsverfahren erste Schritte der Instandsetzungsplanung innerhalb der BIM-Umgebung durchgeführt werden, wie bspw. die Bewertung der Eignung von Verfahren oder die benötigte Schichtdicke des Betonersatzes zur Gewährleistung der Dauerhaftigkeit. Darüber hinaus können die Diagnosedaten sowie Instandsetzungsplanungen auch mittels Augmented Reality in situ visualisiert und somit benutzerfreundlich auf der Baustelle weitergenutzt werden.

Keywords: Building Information Modeling, Instandsetzungsplanung, Dauerhaftigkeit, Prognosen

Abstract

In the maintenance of buildings and the built infrastructure, the recording of the actual condition and the documentation of the planned and executed work is of central importance. This article is intended to show by way of example how raw data from building diagnosis can be prepared and processed for open-interface use in BIM. The findings of the research work to date show that Building Information Modelling in building maintenance has great potential for effective building diagnosis and efficient life cycle management. A kind of digital building book is being created that bundles all relevant data in an IFC file and can present it clearly. The data is secure, compact, and freely available to all parties involved.

A BIM model enriched with diagnostic data offers significant possibilities for automating and supporting maintenance planning and execution. By spatially locating the inspection results in a three-dimensional context, diagnostic results can be automatically compared and, for example, eccentricities or inclinations of reinforcement cages in reinforced concrete columns can be calculated. In conjunction with the localization of damaged areas, this makes it easier to identify the causes of damage. Based on

the implemented carbonation depths and chloride contents, Bayesian networks are automatically created and calibrated in the background of the BIM environment for various durability models in order to enable more reliable predictions about the future condition of the component. Through the implementation of machine-readable decision trees based on the Technical Rule Maintenance of Concrete Structures (TR IH), the first steps of the maintenance planning can be carried out within the BIM environment for selected maintenance procedures, such as the evaluation of the suitability of procedures or the required layer thickness of the concrete replacement to ensure durability. In addition, the diagnostic data and repair planning can also be visualized in situ by means of augmented reality and thus be used in a user-friendly way on the construction site.

Keywords: building information modeling, maintenance, durability, prognoses

1 Stand der Technik

Bei Bauwerken aus Stahlbeton werden Nutzungsdauern von einigen Jahrzehnten angestrebt, die bei Infrastrukturbauten regelmäßig überschritten werden. Da ein Bauwerksversagen nicht tolerierbar ist und Instandhaltungsarbeiten große Verkehrsbehinderungen sowie enorme volkswirtschaftliche Belastungen darstellen, kommt der Dauerhaftigkeitsbemessung eine besondere Bedeutung zu. In den vergangenen Jahren wurden Konzepte zur Bemessung der Dauerhaftigkeit von Stahlbetonbauwerken nach dem sogenannten Performance-Prinzip, also auf probabilistischer Ebene, entwickelt. Diese Ingenieurmodelle basieren auf Laboruntersuchungen oder langjährigen Erfahrungen mit Korrosionsschäden am Bauwerksbestand. Verschiedene Modelle liefern jedoch auch beim gleichen Schadensmechanismus unterschiedliche Ergebnisse bei der Zuverlässigkeitsbestimmung [1].

Die derzeit anerkannten probabilistischen Konzepte beschreiben jeweils nur einen Schädigungsmechanismus (bspw. Carbonatisierung oder Chlorideinwirkung), Kombinationen werden außer Acht gelassen. Eine gegenseitige Beeinflussung der verschiedenen Mechanismen ist jedoch nachgewiesen [2]. Der signifikante Einfluss von Rissen ist ebenfalls bekannt [3,4]. Als populärer Ansatz zur Erstellung von Prognosemodellen werden zunehmend künstliche Intelligenzen (KI) verwendet [5-7]. Zuverlässigkeit und Haftungsrisiken sind jedoch kritisch zu bewerten, wenn die Modellierung vollständig an eine KI vergeben wird. Hinzu kommt, dass KIs in besonderem Maße auf umfangreiche Datengrundlagen und Trainingsphasen angewiesen sind und die nötigen Randbedingungen dafür noch nicht vorliegen. Bei den derzeitigen Entwicklungen handelt es sich um vereinfachte Betrachtungen, die dennoch komplexe, wissenschaftliche Modellierungsansätze hervorbringen, die noch nicht für die Praxisanwendung geeignet sind.

Anstelle der Entwicklung neuer Modelle fordert die Fachwelt die Kalibrierung und somit Verallgemeinerung bestehender Modelle [8]. In der Bauforschung können dazu Bayes'sche Netze genutzt werden [9-12]. Von der baupraktischen Realisierung sind diese jedoch weit entfernt, da die gewöhnlichen Modelle schon zu komplex für die flächendeckende Anwendung sind und Entwurf und Analyse Bayes'scher Netze die benötigte Fachkompetenz weiter erhöhen. Damit die Modelle tatsächlich Anwendung finden, müssen sie so weit vereinfacht werden, dass sie ohne tiefgehende statistische Fachkenntnisse verwendet werden können. Daher wurden Nomogramme entwickelt [13] und in den jüngsten Regelwerken [14] eingeführt, die ingenieurmäßig eine grafische Bestimmung der Zuverlässigkeit ermöglichen sollen. Die Nomogramme zur Dauerhaftigkeitsbemessung stoßen bei der Fachwelt jedoch auf Zurückhaltung und Einsprüche [15], da sie die Modelle simplifizieren und diese dadurch an Zuverlässigkeit und Transparenz einbüßen. Eine gezielte Betrachtung bzw. Anpassung einzelner Parameter ist dann kaum noch möglich, obwohl diese erheblichen Einfluss auf das Endergebnis haben können. So wird beispielsweise der Altersexponent, ein besonders schlecht zu validierender, jedoch einflussreicher Modellparameter, kritisch diskutiert [16]. Durch unrealistische Annahmen aus Literaturwerten oder vergangenen Laboruntersuchungen, deren mangelhafte Übertragbarkeit auf den verbauten Beton nachgewiesen ist [17], können irreführende Zuverlässigkeitswerte ermittelt werden [18].

Ein weiterer Mangel des Status Quo ist, dass immer innovativere Baustoffe entwickelt werden, für die nach heutigem Stand keine praxistauglichen Materialmodelle vorliegen bzw. altbewährte Annahmen

nicht gelten. So werden derzeit als Ersatz für umweltschädliche Zemente als Bindemittel immer häufiger alkalisch-aktivierte Materialien verwendet, die sich bzgl. der Dauerhaftigkeit signifikant anders verhalten [19]. Diese neuen Materialien führen aufgrund der geringen und relativ jungen Verbreitung zwar derzeit noch kaum zu Dauerhaftigkeitsproblematiken in der Praxis, werden jedoch international zunehmend bei der Instandsetzung verwendet, sodass sie auch einen Einfluss auf die Dauerhaftigkeit von Bestandsbauten haben. Es bedarf also möglichst allgemeingültiger Modelle, die mit Ist-Daten des Bauwerksmonitorings kalibriert und auf einem baupraktischen Niveau angewandt werden können. Eine praxismgerechte Lösung für dieses Problem könnten BIM-zentrierte Konzepte sein, wie sie in der Baustatik und -dynamik bereits erprobt werden [20,21].

Die nachträgliche Erstellung eines As-Built-Modells in BIM ist durch Laserscans und Punktwolken mittlerweile präzise und wirtschaftlich realisierbar [22,23]. Es wurden bereits prototypische Digitale Zwillinge von Ingenieurbauten erstellt und für die Instandhaltung [24] bzw. Verknüpfung von Structural Health Monitoring mit BIM [25,26] genutzt. Am ibac werden Möglichkeiten erforscht, um flächendeckend Baustoffinformationen maschinenlesbar in BIM-Modelle zu übertragen, diese für die Kalibrierung von Prognose-Modellen zu nutzen und die Ergebnisse anschließend für weitere Analysen zu exportieren sowie im 3D-Modell zu visualisieren [27-30]. Der vorliegende Beitrag soll die bisherigen Forschungsergebnisse zusammenfassen bzw. die neugewonnen Möglichkeiten aufzeigen und einen Ausblick auf die weiteren Arbeiten geben.

2 Anreicherung und Funktionalisierung

2.1 Implementierung der Ist-Zustände

Für eine effektive BIM-basierte Zustandserfassung und -bewertung müssen die verschiedenen Diagnoseergebnisse vollständig maschinenlesbar und ortsaufgelöst in das Modell übertragen werden. Dazu müssen die Daten aus dem jeweiligen Messgerät in ein gängiges Format wie bspw. Excel-Tabellen exportiert werden. Auf diese Weise werden die Diagnosedaten für eine kollaborative Weiterverarbeitung zur Verfügung gestellt. Anschließend erfolgt die Implementierung im BIM-Modell über Python-Skripte, die über das Dynamo-Plugin als Schnittstelle in Revit (Autodesk) ausgeführt werden können. Auf diese Weise kann die Korrosionsaktivität als Ergebnis einer flächigen Potenzialfeldanalyse ebenso im BIM-Modell hinterlegt und visualisiert werden wie der tiefengestaffelte Chloridgehalt, siehe Bild 1. Während zur Implementierung der Daten Revit genutzt wurde, erfolgte die Darstellung und Einfärbung der Objekte entsprechend ihrer Eigenschaften (Potenzial bzw. Chloridgehalt) in der Software BIMvision unter Verwendung des Plugins Advanced Reports. Mit entsprechenden Skripten können auch Bohrkerne, Schadstellen, Hohllagen, Rissbilder sowie Betondeckungsmessungen implementiert werden. Auf diese Weise können die Ist-Zustände im BIM-Modell hinterlegt werden.

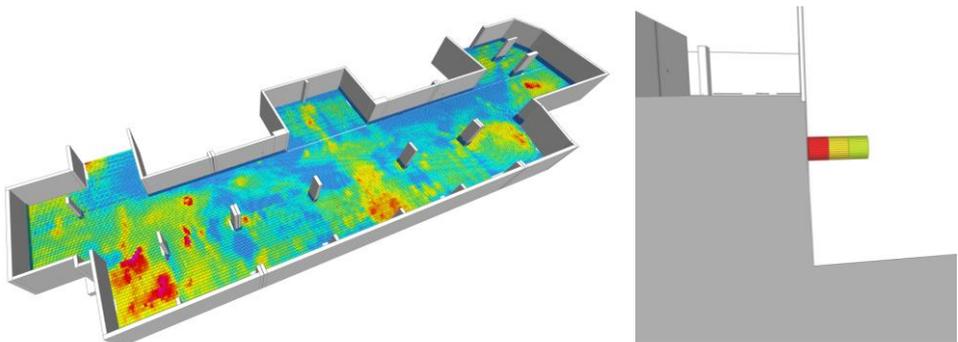


Bild 1 Maschinenlesbares Potenzialfeld (links) und Chloridprofil (rechts) im BIM-Modell visualisiert und entsprechend einer Farblegende eingefärbt

Aufbauend auf der Zustandserfassung können die Bauteile nun effizient hinsichtlich ihrer Instandsetzungsbedürftigkeit bewertet werden. Die Diagnoseergebnisse können variabel ein- und ausgeblendet

werden. Es können einzelne Eigenschaften oder auch ihre Kombinationen betrachtet werden. Flächige Scans können in übereinander liegenden Lagen angezeigt werden.

2.2 Prädiktive BIM-Modelle

Neben den unmittelbaren Messgrößen wie bspw. der Carbonatisierungstiefe können auch andere Informationen dargestellt werden wie bspw. die zu erwartende Lebensdauer. Die Berechnung solcher sekundären Größen kann ebenfalls im Hintergrund der BIM-Umgebung durchgeführt werden. Für gängige Korrosionsmodelle wurden am ibac bereits BIM-kompatible Skripte geschrieben, die Prognosen und andere Berechnungen durchführen und somit bspw. die Versagenswahrscheinlichkeit eines Bauteiles im BIM-Modell darstellen können. Zur Berechnung der Bauteilzuverlässigkeiten wurden die Modelle des fib Model Code for Service Life Design [31] für Carbonatisierung und Chlorideintrag über Python-Skripte in der BIM-Umgebung implementiert. Die Modelle werden automatisch anhand der vorliegenden Diagnosedaten mittels Bayes'scher Netzwerke kalibriert und erlauben daher relativ zuverlässige Aussagen über den zeitlichen Verlauf der Schädigungsprozesse. Die Kalibrierung der Modelle erfolgt bauteilspezifisch basierend auf den im jeweiligen Bauteil implementierten Diagnosedaten (Carbonatisierungstiefe, Chloridprofile). Durch die Gegenüberstellung dieser Einwirkungen (Carbonatisierung, Chlorideintrag) mit den Widerständen (Betondeckung bzw. Bewehrungslage) können Versagenswahrscheinlichkeiten und Zuverlässigkeitsindizes berechnet werden.

3 Planung und Ausführung von Instandhaltungsmaßnahmen

Durch die Implementierung der Diagnosedaten sowie der Schädigungsmodelle können die funktionalisierten BIM-Modelle nicht nur den gegenwärtigen Ist-Zustand, sondern auch den zukünftigen Bauteilzustand prognostizieren, sodass die ersten Schritte der grundsätzlichen Vorgehensweise bei der Planung und Ausführung von Instandhaltungsmaßnahmen nach der Technischen Regel Instandhaltung von Betonbauwerken (TR IH), siehe Bild 2, in der BIM-Umgebung umgesetzt werden können.

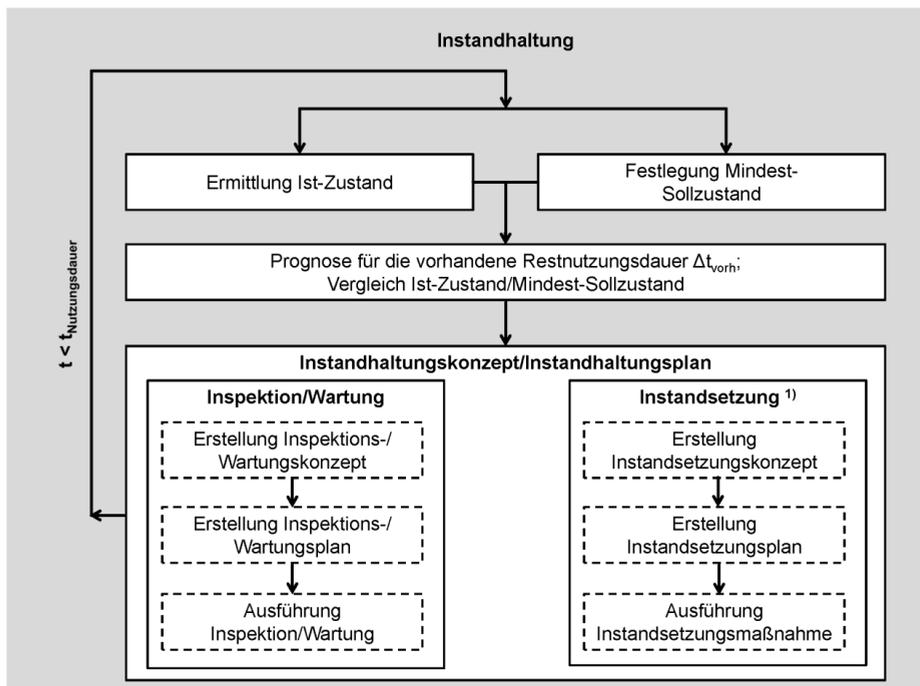


Bild 2 Grundsätzliche Vorgehensweise bei der Planung und Ausführung von Instandhaltungsmaßnahmen [32]

3.1 Eignungsprüfung von Instandsetzungsverfahren nach definierten Kriterien

Neben den Diagnosedaten und Prognosemodellen wurden bereits Kriterien der TR IH, Teil 1, zur Bewertung der Eignung von Instandsetzungsverfahren in der BIM-Umgebung implementiert. Entsprechend ist das BIM-Modell in der Lage, basierend auf den Informationen zu Carbonatisierungstiefen, Chloridgehalten und Betondeckungen die Eignung bestimmter Verfahren zu prüfen und ggf. auch die Ausführung weiter zu beschreiben. Beispielsweise ist Verfahren 7.1 „Erhöhung bzw. Teilersatz der Betondeckung mit zusätzlichem Mörtel oder Beton zum Erhalt oder der Wiederherstellung der Passivität“ nur anwendbar, solange die Carbonatisierungsfront noch mindestens 10 mm von der Bewehrung entfernt ist [32]. Verfahren 7.4 „Realkalisierung von carbonatisiertem Beton durch Diffusion zum Erhalt oder der Wiederherstellung der Passivität“ ist nur bei Carbonatisierungstiefen von unter 40 mm anwendbar [32]. Sollten diese Kriterien nicht erfüllt sein, so kann bspw. Verfahren 7.2 „Ersatz von chloridhaltigem oder carbonatisiertem Beton zum Erhalt oder der Wiederherstellung der Passivität“ angewandt werden. Entsprechend ergeben sich zeitliche Grenzen zur Anwendbarkeit der Instandsetzungsverfahren in Abhängigkeit des Carbonatisierungsfortschrittes, siehe Bild 3.

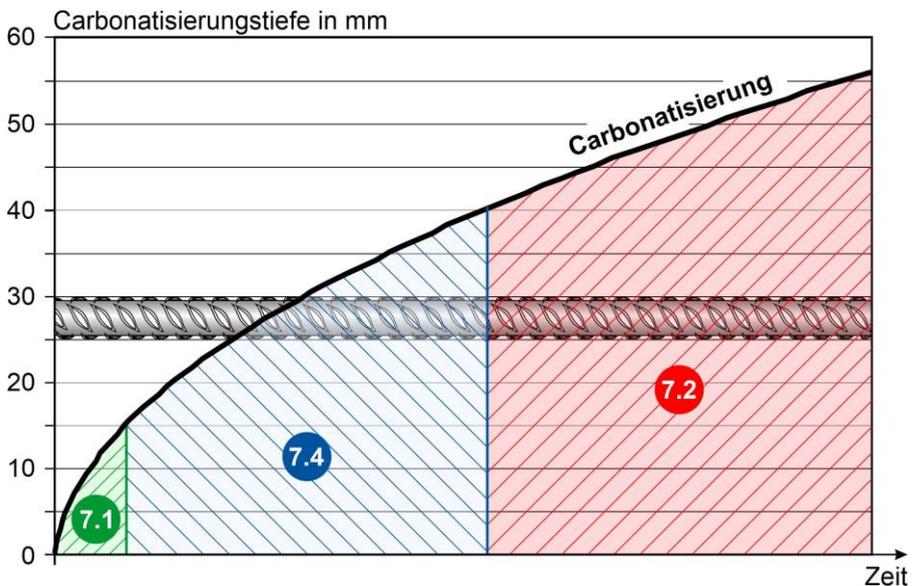


Bild 3 Anwendbarkeit von Instandsetzungsverfahren in Abhängigkeit der Zeit bzw. des Carbonatisierungsfortschrittes

Das funktionalisierte BIM-Modell ist in der Lage, den Carbonatisierungsfortschritt zu prognostizieren und enthält Informationen zur Bewehrungslage, sodass es abschätzen kann, wie lange welche Instandsetzungsverfahren noch anwendbar sind. Unter Berücksichtigung der Restnutzungsdauer können somit geeignete Zeitpunkte für Instandsetzungsverfahren abgeschätzt werden. Bild 4 zeigt dies schematisch für die Instandsetzungsverfahren 7.1, 7.2 und 7.4. Über die Zeit verschlechtert sich der Bauteilzustand und je nach Zustand sind unterschiedliche Verfahren (nicht mehr) anwendbar. Entsprechend ergeben sich unterschiedliche Zustände am Ende der geplanten Restnutzungsdauer. Ein Unterschreiten der Abnutzungsgrenze ist nicht tolerierbar, sodass in diesem Fall eine weitere Instandsetzung erforderlich wäre. Ein Überschreiten der Abnutzungsgrenze am Ende der Nutzungsdauer könnte als Ressourcenverschwendung angesehen werden, da ggf. ein höherer Instandsetzungsaufwand benötigt wurde und die resultierende Dauerhaftigkeit nicht erforderlich war. Zur vollständigen Ausnutzung der Dauerhaftigkeit sollte der Zustand gegen Ende der Nutzungsdauer möglichst nah oberhalb der akzeptablen Abnutzungsgrenze liegen bzw. der erforderliche Aufwand zur Gewährleistung der Nutzbarkeit minimiert werden. Entsprechend prädiktive BIM-Modelle können daher dabei unterstützen, sowohl die Wahl des Instandsetzungsverfahrens als auch des Instandsetzungszeitpunktes zu optimieren.

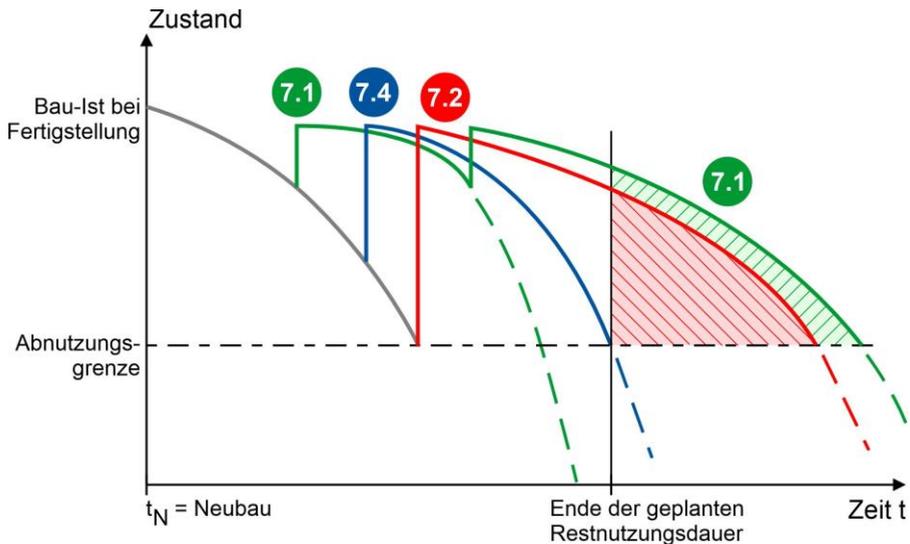


Bild 4 Zustandsverläufe über die Nutzungsdauer je nach gewähltem Instandsetzungsverfahren

3.2 Implementierung der Soll-Zustände

Nach erfolgter Eignungsprüfung, Auswahl und Bemessung von Instandsetzungsverfahren können auch die jeweiligen Maßnahmen als neue Soll-Zustände im BIM-Modell hinterlegt werden. So ist es beispielsweise möglich, den Betonabtrag zu modellieren, indem die Bauteildicken im Modell entsprechend reduziert werden. Gleichsam könnte das Betoneratzsystem als neues Objekt auf der alten Bauteiloberfläche hinzugefügt werden. Auf diese Weise könnte das BIM-Modell den gegenwärtigen und zukünftigen Zustand auch geometrisch darstellen.

4 Fazit

Das vorgestellte Konzept zur Digitalisierung der Bauwerkserhaltung baut auf den technischen Fortschritten der letzten Jahre auf und leitet eine modellzentrierte Arbeitsweise ein. Daten werden strukturiert aufbereitet, gesammelt und vernetzt. Dauerhaftigkeitsmodelle werden automatisch basierend auf vorliegenden Diagnosedaten kalibriert und ermöglichen Prognosen über zukünftige Bauteilzustände. Mit BIM-gestützten Auswertungen werden Instandsetzungsverfahren hinsichtlich ihrer Eignung und Ausführung analysiert und Zustandsbewertungen unterstützt.

Aus dem bisherigen Arbeitsstand können folgende Schlussfolgerungen gezogen werden:

- BIM-implementierte Diagnosedaten ermöglichen effiziente Analysen
- Untersuchungsergebnisse bleiben maschinenlesbar erhalten und können für weitere Analysen genutzt werden (digitales Bauwerksbuch)
- Datenanalyse und Handlungsempfehlungen über BIM-Modelle führen zu zeitlich und örtlich aufgelösten Zustandsbewertungen
- Automatisierung und Funktionalisierung erhöhen den Nutzen von BIM im Bestand

4.1 Ausblick

Derzeit forscht das ibac an der Erweiterung der vorgestellten Methoden, sodass weitere Instandsetzungsverfahren implementiert bzw. geprüft und Daten von Monitoring-System für noch präzisere Prognosen genutzt werden können. Weiterhin wird der gesamte Workflow von der proprietären Software Revit übertragen zur Nutzung in kostenlosen Open-Source-Programmen. Weiterhin wird angestrebt, zukünftig Instandhaltungspläne auch unter Berücksichtigung von Kosteneffizienz und Umweltaspekten automatisiert zu generieren.

5 Quellen

- [1] *Angst, U.M.*: Predicting the time to corrosion initiation in reinforced concrete structures exposed to chlorides. In: *Cement and Concrete Research* 115 (2019), S. 559-567. 10.1016/j.cemconres.2018.08.007.
- [2] *Zhu, X.; Zi, G.; Sun, L.; You, I.*: A simplified probabilistic model for the combined action of carbonation and chloride ingress. In: *Magazine of Concrete Research* 71 (2019), 7, S. 327-340. 10.1680/jmacr.18.00140.
- [3] *Al-Ameeri, A.S.; Rafiq, M.I.; Tsioulou, O.*: Combined impact of carbonation and crack width on the Chloride Penetration and Corrosion Resistance of Concrete Structures. In: *Cement and Concrete Composites* 115 (2021). 10.1016/j.cemconcomp.2020.103819.
- [4] *Pacheco, J.*: Incorporating Cracks in Chloride Ingress Modeling and Service Life Predictions. In: *ACI Materials Journal* 116 (2019), 5.
- [5] *Gong, X.; Dong, C.; Xu, J.; Wang, L.; Li, X.*: Machine learning assistance for electrochemical curve simulation of corrosion and its application. In: *Materials and Corrosion* 71 (2019), 3, S. 474-484. 10.1002/maco.201911224.
- [6] *Lyne C, C.*: An Artificial Neural Network Model for the Corrosion Current Density of Steel in Mortar Mixed with Seawater. In: *International Journal of GEOMATE* 16 (2019), 56. 10.21660/2019.56.4585.
- [7] *Gao, W.; Chen, X.; Chen, D.*: Genetic programming approach for predicting service life of tunnel structures subject to chloride-induced corrosion. In: *J Adv Res* 20 (2019), S. 141-152. 10.1016/j.jare.2019.07.001.
- [8] *Beushausen, H.; Torrent, R.; Alexander, M.G.*: Performance-based approaches for concrete durability: State of the art and future research needs. In: *Cement and Concrete Research* 119 (2019), S. 11-20. 10.1016/j.cemconres.2019.01.003.
- [9] *Straub, D.; Papaioannou, I.*: Bayesian Updating with Structural Reliability Methods. In: *Journal of Engineering Mechanics* 141 (2015), 3. 10.1061/(asce)em.1943-7889.0000839.
- [10] *Hackl, J.; Kohler, J.*: Reliability assessment of deteriorating reinforced concrete structures by representing the coupled effect of corrosion initiation and progression by Bayesian networks. In: *Structural Safety* 62 (2016), S. 12-23. 10.1016/j.strusafe.2016.05.005.
- [11] *Ben Abdesslem, A.; Dervilis, N.; Wagg, D.; Worden, K.*: Model selection and parameter estimation of dynamical systems using a novel variant of approximate Bayesian computation. In: *Mechanical Systems and Signal Processing* 122 (2019), S. 364-386. 10.1016/j.ymsp.2018.12.048.
- [12] *Cai, B.; Kong, X.; Liu, Y.; Lin, J.; Yuan, X.; Xu, H.; Ji, R.*: Application of Bayesian Networks in Reliability Evaluation. In: *IEEE Transactions on Industrial Informatics* 15 (2019), 4, S. 2146-2157. 10.1109/tii.2018.2858281.
- [13] *Rahimi, A.; Gehlen, C.*: Semiprobabilistische Dauerhaftigkeitsbemessung von Stahlbetonbauten unter Chlorideinwirkung. In: *Beton- und Stahlbetonbau* 113 (2018), 1, S. 13-21. 10.1002/best.201700062.
- [14] *BAW Merkblatt*: Dauerhaftigkeitsbemessung und -bewertung von Stahlbetonbauwerken bei Carbonatisierung und Chlorideinwirkung (MDCC), Karlsruhe (2019)
- [15] *Fingerloos, F.; Gehlen, C.*: Was bedeutet die „geplante Nutzungsdauer“ im Konzept der Dauerhaftigkeitsbemessung bei Parkbauten? In: *Beton- und Stahlbetonbau* 115 (2020), 4, S. 312-323. 10.1002/best.201900089.
- [16] *Grantham, M.G.; Gulikers, J.; Mircea, C.*: Predicting residual service life of concrete infrastructure: a considerably controversial subject. In: *MATEC Web of Conferences* 289 (2019). 10.1051/mateconf/201928908002.
- [17] *Jacobs, F.*: Dauerhaftigkeit von Beton im Bauteil. In: *Beton- und Stahlbetonbau* 114 (2019), 6, S. 383-391. 10.1002/best.201900003.
- [18] *Alexander, M.; Beushausen, H.*: Durability, service life prediction, and modelling for reinforced concrete structures – review and critique. In: *Cement and Concrete Research* 122 (2019), S. 17-29. 10.1016/j.cemconres.2019.04.018.
- [19] *Mangat, P.S.; Ojedokun, O.O.; Lambert, P.*: Chloride-initiated corrosion in alkali activated reinforced concrete. In: *Cement and Concrete Composites* 115 (2021). 10.1016/j.cemconcomp.2020.103823.

- [20] *Herbrand, M.; Wenner, M.; Ullerich, C.; Rauert, T.; Zehetmaier, G.; Marx, S.*: Beurteilung der Bauwerkszuverlässigkeit durch Bauwerksmonitoring. In: Bautechnik 98 (2021), 2, S. 93-104. 10.1002/bate.202000094.
- [21] *Davila Delgado, J.M.; Butler, L.J.; Gibbons, N.; Brilakis, I.; Elshafie, M.Z.E.B.; Middleton, C.*: Management of structural monitoring data of bridges using BIM. In: Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Bridge Engineering 170 (2017), 3, S. 204-218. 10.1680/jbren.16.00013.
- [22] *Bednorz, J.; Hindersmann, I.; Jaeger, K.; Marszalik, M.*: Methoden zur Generierung von As-Built-Modellen für Bestandsbrücken. In: Bautechnik 97 (2020), 4, S. 286-294.
- [23] *Wang, Q.; Sohn, H.; Cheng, J.C.P.*: Automatic As-Built BIM Creation of Precast Concrete Bridge Deck Panels Using Laser Scan Data. In: Journal of Computing in Civil Engineering 32 (2018), 3. 10.1061/(asce)cp.1943-5487.0000754.
- [24] *Grabe, M.; Ullerich, C.; Wenner, M.; Herbrand, M.*: smartBridge Hamburg – prototypische Pilotierung eines digitalen Zwillings. In: Bautechnik 97 (2020), 2, S. 118-125. 10.1002/bate.201900108.
- [25] *Hartung, R.; Naraniecki, H.; Klemm-Albert, K.; Marx, S.*: Konzept zur BIM-basierten Instandhaltung von Ingenieurbauwerken mit Monitoringsystemen. In: Bautechnik 97 (2020), 12, S. 826-835. 10.1002/bate.202000095.
- [26] *Byun, N.; Han, W.S.; Kwon, Y.W.; Kang, Y.J.*: Development of BIM-Based Bridge Maintenance System Considering Maintenance Data Schema and Information System. In: Sustainability 13 (2021), 9. 10.3390/su13094858.
- [27] *Morgenstern, H.; Raupach, M.*: BIM-centred building diagnoses as a decision support tool for maintenance and repair. In: e-Journal of Nondestructive Testing (2022). 10.58286/27287
- [28] *Morgenstern, H.; Raupach, M.*: Quantified point clouds and enriched BIM-Models for digitalised maintenance planning. In Proceedings of the MATEC Web of Conferences, Cape Town, 2022.
- [29] *Morgenstern, H.; Raupach, M.*: A Novel Approach for Maintenance and Repair of Reinforced Concrete Using Building Information Modeling with Integrated Machine-Readable Diagnosis Data. In: Construction Materials 2 (2022), 4, S. 314-327. 10.3390/constrmater2040020.
- [30] *Morgenstern, H.; Raupach, M.*: Predictive BIM with Integrated Bayesian Inference of Deterioration Models as a Four-Dimensional Decision Support Tool. In: CivilEng 4 (2023), 1, S. 185-203. 10.3390/civileng4010012.
- [31] *Schiessl, P.B., Phil; Baroghel-Bouny, Véronique; Corley, Gene; Faber, Michael; Forbes, Jim; Gehlen, Christoph; Helene, Paulo; Helland, Steinar; Ishida, Tetsuya; Markeset, Gro; Nilsson, Lars-Olof; Rostam, Steen; Siemes, A.J.M.; Walraven, Joost.* fib Bulletin 34. Model Code for Service Life Design; fib. The International Federation for Structural Concrete: 2006.
- [32] *Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt)*: Technische Regel – Instandhaltung von Betonbauwerken (TR Instandhaltung), Teil 1: Anwendungsbereich und Planung der Instandhaltung, Berlin (2020)